

**PENGARUH VARIASI LAMA WAKTU PENEMBAKAN PADA
PROSES *SHOT PEENING* TERHADAP KEKERASAN DAN LAJU
KOROSI SAMBUNGAN LAS SMAW PIPA ASTM A106 Gr. B**

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK MANUFAKTUR

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



ACHIRUL JAMHAR

NIM. 175060201111001

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG**

2021

LEMBAR PENGESAHAN

PENGARUH VARIASI LAMA WAKTU PENEMBAKAN PADA PROSES *SHOT PEENING* TERHADAP KEKERASAN DAN LAJU KOROSI SAMBUNGAN LAS SMAW PIPA ASTM A106 Gr. B

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK MANUFAKTUR

**Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik**




**ACHIRUL JAMHAR
NIM. 175060201111001**

Skripsi telah direvisi dan disetujui oleh Dosen Pembimbing pada tanggal 24 Juli 2021

Dosen Pembimbing 1

Teguh Dwi Widodo, ST., M.Eng. Ph.D.
NIP. 201411 841123 1 001

Dosen Pembimbing 2

Rudianto Raharjo, ST., MT.
NIP. 19820225 201212 1 002

**Mengetahui
Ketua Program Studi Sarjana,**


Dr.Eng. Mega Nuk Sasongko, ST., MT.
NIP. 19740930 200012 1 001



PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah, yang diteliti dan diulas di dalam naskah skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia skripsi ini dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, Pasal 25 ayat 2 dan Pasal 70).

Malang, 1 Juli 2021

Mahasiswa,



Achirul Jamha

NIM. 175060201111001



UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM SARJANA



SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI

Nomor : 793/UN10.F07.12.11/PP/2021

Sertifikat ini diberikan kepada :

ACHIRUL JAMHAR

Dengan Judul Skripsi :

**PENGARUH VARIASI LAMA WAKTU PENEMBAKAN PADA PROSES SHOT PEENING
TERHADAP KEKERASAN DAN LAJU KOROSI SAMBUNGAN LAS SMAW PIPA ASTM**

A106 Gr. B

Telah dideteksi tingkat plagiasinya dengan kriteria toleransi $\leq 20\%$, dan
dinyatakan Bebas dari Plagiasi pada tanggal

Malang, 26 Juli 2021

Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin

MEGA NUR SASONGKO, ST., MT., Dr. Eng
NIP. 19740930 200012 1 001



Prof. DJARDI B. DARMAJI, Ir., MT., Ph.D
NIP. 19670518 199412 1 001



JUDUL SKRIPSI:

Pengaruh Variasi Lama Waktu Penembakan Pada Proses *Shot Peening* Terhadap Kekerasan dan Laju Korosi Sambungan Las SMAW Pipa ASTM A106 Gr. B

Nama Mahasiswa : Achirul Jamhar

NIM : 175060201111001

Program Studi : Teknik Mesin

Konsentrasi : Teknik Manufaktur

KOMISI PEMBIMBING

Dosen Pembimbing I : Teguh Dwi Widodo, ST., M.Eng., Ph.D.

Dosen Pembimbing II : Rudianto Raharjo, ST., MT.

TIM DOSEN PENGUJI

Dosen Penguji I : Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT.

Dosen Penguji II : Redi Bintarto, ST., M.Eng.Pract.

Dosen Penguji III : Nafisah Arina Hidayati, ST., M.Eng.

Tanggal Ujian : 15 Juli 2021

SK Penguji : 1230/UN10.F07/SK/2021







*Teruntuk Ibu dan Bapak tercinta,
Terima kasih banyak atas perjuangannya.*



KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas segala limpahan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga skripsi yang berjudul **“Pengaruh Variasi Lama Waktu Penembakan pada Proses Shot Peening Terhadap Kekerasan dan Laju Korosi Sambungan Las SMAW Pipa ASTM A106 Gr. B”** ini dapat terselesaikan dengan baik.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan dan penyelesaian skripsi ini telah dibantu oleh banyak pihak. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian skripsi ini.

1. Bapak Prof. Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D., selaku Ketua Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
2. Bapak Teguh Dwi Widodo, ST., M.Eng., Ph.D., selaku Sekretaris Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya dan Dosen Pembimbing I skripsi yang telah memberikan bimbingan dan motivasi dalam penyusunan skripsi ini.
3. Bapak Dr.Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT., selaku Kepala Program Studi S1 Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
4. Bapak Dr. Ir. Achmad As’ad Sonief, MT., selaku Ketua Kelompok Dasar Keahlian Teknik Manufaktur Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
5. Bapak Rudianto Raharjo, ST., MT., selaku Dosen pembimbing II skripsi yang telah memberikan bimbingan dan motivasi dalam penyusunan skripsi ini.
6. Bapak Hari dan Ibu Sri selaku orang tua penulis yang selalu memberikan motivasi dan mendoakan penulis hingga saat ini.
7. Mbak Esty, Mbak Evin dan Albar sebagai saudara saya yang selalu memberikan semangat dan dukungannya dalam menyelesaikan penyusunan skripsi ini.
8. Segenap Staf Pengajar khususnya Dosen – Dosen dan jajaran Staf Karyawan Jurusan Teknik Mesin dan Fakultas Teknik.
9. Teman seperjuangan Anwar dan Bos Ferdian, serta teman-teman komunal A yang telah berjuang bersama dari maba hingga saat ini.
10. Rekan-rekan Asisten Laboratorium Otomasi Manufaktur : Roxi, Luthfi, Azmi, Hafiz, Akmal, Adnan, Havidz, Ucup dan Isal yang memberikan semangat dan bantuan dalam bentuk apapun.
11. Teman - teman M’17 yang selalu memberikan semangat dan bantuan dalam bentuk apapun.

12. Semua pihak yang telah membantu terselesaikannya penyusunan skripsi ini, yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu.

Penulis menyadari bahwa laporan skripsi ini tidak lepas dari kekurangan. Oleh karena itu penulis sangat menghargai setiap saran dan masukan untuk kesempurnaan laporan skripsi ini. Semoga laporan skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis dan pembaca sekaligus bisa menjadi bahan acuan untuk penelitian selanjutnya.

Malang, Juli 2021

Penulis



DAFTAR ISI

| | |
|---|------|
| KATA PENGANTAR | i |
| DAFTAR ISI | iii |
| DAFTAR TABEL | vii |
| DAFTAR GAMBAR | ix |
| DAFTAR LAMPIRAN | xiii |
| RINGKASAN | xv |
| SUMMARY | xvii |
| BAB I PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah | 3 |
| 1.3 Batasan Masalah | 3 |
| 1.4 Tujuan Penelitian | 3 |
| 1.5 Manfaat Penelitian | 3 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA | 5 |
| 2.1 Penelitian Sebelumnya | 5 |
| 2.2 <i>Shot Peening</i> | 7 |
| 2.2.1 Definisi <i>Shot Peening</i> | 7 |
| 2.2.2 Parameter <i>Shot Peening</i> | 8 |
| 2.2.3 Lama Waktu Penembakan | 9 |
| 2.3 Kekerasan | 10 |
| 2.3.1 Metode-metode Pengujian Kekerasan | 10 |
| 2.4 Korosi | 12 |
| 2.4.1 Definisi Korosi | 12 |
| 2.4.2 Klasifikasi Korosi | 13 |
| 2.4.3 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Terjadinya Korosi | 17 |
| 2.4.4 Laju Korosi | 18 |
| 2.5 Proses Manufaktur | 19 |
| 2.6 Proses Pengelasan (<i>Welding</i>) | 20 |
| 2.6.1 Macam-macam Proses Pengelasan Busur | 21 |
| 2.6.2 Parameter Pengelasan pada SMAW | 25 |
| 2.6.3 Posisi Pengelasan pada Pipa | 27 |
| 2.7 <i>Carbon Steel</i> | 28 |

| | |
|--|-----------|
| 2.7.1 Pipa ASTM A106 | 29 |
| 2.8 Minyak Mentah | 29 |
| 2.9 Hipotesis | 30 |
| BAB III METODE PENELITIAN | 31 |
| 3.1 Metode Penelitian | 31 |
| 3.2 Tempat dan Waktu Penelitian | 31 |
| 3.3 Variabel Penelitian | 31 |
| 3.4 Alat dan Bahan Penelitian | 32 |
| 3.5 Dimensi Spesimen | 41 |
| 3.6 Skema Penelitian | 43 |
| 3.6.1 Instalasi Proses <i>Shot Peening</i> | 44 |
| 3.7 Prosedur Penelitian | 44 |
| 3.8 Prosedur Pengujian Spesimen | 45 |
| 3.9 Diagram Alir Penelitian | 47 |
| BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN | 49 |
| 4.1 Data Hasil Pengujian | 49 |
| 4.1.1 Data Hasil Pengujian Kekerasan Sambungan Las Pipa ASTM A106 Gr. B | 49 |
| 4.1.2 Data Hasil Pengujian Kekerasan Daerah HAZ dengan Variasi Lama Waktu Penembakan pada Sambungan Las Pipa ASTM A106 Gr. B | 49 |
| 4.1.3 Data Hasil Pengujian Laju Korosi Sambungan Las Pipa ASTM A106 Gr. B dengan Variasi Lama Waktu Penembakan | 51 |
| 4.2 Hasil Pengolahan Data Pengujian Kekerasan Sambungan Las Pipa ASTM A106 Gr. B | 52 |
| 4.2.1 Grafik Persebaran Nilai Kekerasan Daerah Las | 52 |
| 4.2.2 Analisis dan Pembahasan Grafik Persebaran Nilai Kekerasan Daerah Las | 52 |
| 4.3 Data Hasil Foto Mikrostruktur Sambungan Las SMAW Pipa ASTM A106 Gr. B53 | 53 |
| 4.3.1 Hasil Foto Mikrostruktur Sambungan Las SMAW Pipa ASTM A106 Gr. B53 | 53 |
| 4.3.2 Analisis dan Pembahasan Hasil Foto Mikrostruktur Sambungan Las SMAW Pipa ASTM A106 Gr. B | 53 |
| 4.4 Hasil Pengolahan Data Pengujian Kekerasan Daerah HAZ (<i>Heat Affected Zone</i>) | 54 |
| 4.4.1 Grafik Pengaruh Variasi Lama Waktu Penembakan terhadap Kekerasan Daerah HAZ (<i>Heat Affected Zone</i>) | 54 |
| 4.4.2 Analisis dan Pembahasan Grafik Pengaruh Lama Waktu Penembakan Terhadap Kekerasan Daerah HAZ (<i>Heat Affected Zone</i>) | 54 |

| | |
|---|-----------|
| 4.5 Hasil Pengolahan Data Pengujian Laju Korosi Sambungan Las SMAW Pipa ASTM A106 Gr. B..... | 55 |
| 4.5.1 Grafik Pengaruh Variasi Lama Waktu Penembakan Terhadap Laju Korosi Sambungan Las SMAW Pipa ASTM A106 Gr. B..... | 55 |
| 4.5.2 Analisis dan Pembahasan Grafik Pengaruh Lama Waktu Penembakan Terhadap Laju Korosi Sambungan Las SMAW Pipa ASTM A106 Gr. B..... | 56 |
| 4.6 Data Hasil Foto Makro pada Spesimen..... | 57 |
| 4.6.1 Gambar Hasil Foto Makro Spesimen..... | 57 |
| 4.6.2 Analisis Gambar Hasil Foto Makro Spesimen Sebelum dan Sesudah Pengujian Laju Korosi..... | 57 |
| 4.7 Data Hasil Pengolahan Grafik Polarisasi dari Pengujian Laju Korosi Spesimen..... | 58 |
| 4.7.1 Data Hasil Pengolahan Grafik Polarisasi Laju Korosi setiap Perlakuan Spesimen dengan Variasi Lama Waktu Penembakan..... | 58 |
| 4.7.2 Analisis Grafik Polarisasi Laju Korosi dengan Variasi Lama Waktu Penembakan pada Pipa ASTM A106 Gr. B..... | 59 |
| 4.8 Data Hasil Foto <i>Scanning Electron Microscope</i> | 60 |
| 4.8.1 Hasil Foto <i>Scanning Electron Microscope</i> Spesimen dengan Variasi Lama Waktu Penembakan pada Proses <i>Shot Peening</i> | 60 |
| 4.8.2 Analisis Hasil Foto <i>Scanning Electron Microscope</i> Spesimen dengan Variasi Lama Waktu Penembakan pada Proses <i>Shot Peening</i> | 61 |
| BAB V PENUTUP | 63 |
| 5.1 Kesimpulan | 63 |
| 5.2 Saran..... | 64 |
| DAFTAR PUSTAKA | |
| LAMPIRAN | |



Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

| | | |
|-----------|---|----|
| Tabel 2.1 | Tingkat ketahanan laju korosi dalam satuan metrik | 18 |
| Tabel 3.1 | Komposisi Kimia Material Pipa ASTM A106 Gr. B | 38 |
| Tabel 3.2 | Komposisi Kimia Elektroda AWS E7016 | 39 |
| Tabel 3.3 | Komposisi Kimia <i>Shot Ball</i> | 41 |
| Tabel 4.1 | Hasil Uji Kekerasan Spesimen Sebelum Proses <i>Shot Peening</i> | 49 |
| Tabel 4.2 | Hasil Pengujian Kekerasan Daerah HAZ dengan Variasi Lama Waktu Penembakan Pada Sambungan Las Pipa ASTM A106 Gr. B | 50 |
| Tabel 4.3 | Hasil Pengujian Laju Korosi pada Sambungan Las Pipa ASTM A106 Gr. B .. | 51 |
| Tabel 4.4 | Nilai Karakteristik dari Hasil Pengujian Laju Korosi Sambungan Las Pipa ASTM A106 Gr. B | 58 |





Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|-------------|--|----|
| Gambar 2.1 | Grafik hasil nilai kekerasan pada <i>aluminum alloy</i> 2024 berdasarkan <i>peening time</i> | 5 |
| Gambar 2.2 | Grafik hasil nilai kekerasan pada komposit A17075 berdasarkan <i>peening time</i> | 6 |
| Gambar 2.3 | Grafik hasil nilai kekerasan pada <i>stainless steel</i> 316L berdasarkan <i>peening time</i> | 7 |
| Gambar 2.4 | Foto mikrostruktur A) <i>Base Metal</i> , B) HAZ (<i>Heat Affected Zone</i>), dan C) <i>Weld Metal</i> | 7 |
| Gambar 2.5 | Mekanisme <i>shot peening</i> | 8 |
| Gambar 2.6 | Contoh foto cakupan <i>shot peening</i> (a) cakupan penuh dan (b) cakupan belum sepenuhnya..... | 9 |
| Gambar 2.7 | Skema uji kekerasan vickers..... | 11 |
| Gambar 2.8 | Tabel perbedaan pengujian kekerasan..... | 12 |
| Gambar 2.9 | Ilustrasi pengkorosian logam..... | 13 |
| Gambar 2.10 | Korosi seragam pada pipa <i>ballast</i> | 14 |
| Gambar 2.11 | <i>Pitting corrosion</i> | 14 |
| Gambar 2.12 | <i>Errosion corrosion</i> | 15 |
| Gambar 2.13 | <i>Galvanic corrosion</i> | 15 |
| Gambar 2.14 | <i>Stress corrosion cracking</i> | 16 |
| Gambar 2.15 | <i>Crevise corrosion</i> | 16 |
| Gambar 2.16 | Korosi mikrobiologi..... | 17 |
| Gambar 2.17 | <i>Fatigue corrosion</i> | 17 |
| Gambar 2.18 | Dua cara mendefinisikan proses manufaktur a) <i>Technical process</i> dan b) <i>Economic process</i> | 19 |
| Gambar 2.19 | Daerah Hasil Pengelasan..... | 20 |
| Gambar 2.20 | <i>Shielded Metal Arc Welding</i> | 21 |
| Gambar 2.21 | <i>Gas Tungsten Arc Welding</i> | 22 |
| Gambar 2.22 | <i>Gas Metal Arc Welding</i> | 23 |
| Gambar 2.23 | <i>Flux Cored Arc Welding</i> | 24 |
| Gambar 2.24 | <i>Submerged Arc Welding</i> | 24 |
| Gambar 2.25 | <i>Plasma Arc Welding</i> | 25 |
| Gambar 2.26 | Hukum Ohm..... | 26 |
| Gambar 2.27 | Pengaruh besarnya watt terhadap daerah lasan..... | 26 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Gambar 2.28 | Posisi horizontal 1G pipa berputar | 27 |
| Gambar 2.29 | Posisi horizontal 5G pipa tetap | 28 |
| Gambar 2.30 | Posisi vertikal 2G pipa tetap | 28 |
| Gambar 3.1 | Mesin las ESAB <i>Fabricator 500P</i> | 33 |
| Gambar 3.2 | <i>Spray Gun</i> | 34 |
| Gambar 3.3 | Kompresor | 34 |
| Gambar 3.4 | <i>Stopwatch</i> | 35 |
| Gambar 3.5 | Mesin Uji Kekerasan Eseway EW-410AAT | 35 |
| Gambar 3.6 | Mikroskop Optik Nikon 59525 | 36 |
| Gambar 3.7 | Hitachi TM3000 <i>Scanning electron microscope</i> | 36 |
| Gambar 3.8 | <i>Digital Microscope</i> | 37 |
| Gambar 3.9 | <i>Potentiosat/Galvanostat Instrument</i> | 37 |
| Gambar 3.10 | Spesimen pipa ASTM A106 Gr. B | 39 |
| Gambar 3.11 | Elektroda | 39 |
| Gambar 3.12 | Gerinda Tangan | 40 |
| Gambar 3.13 | <i>Shot ball</i> | 40 |
| Gambar 3.14 | Minyak Mentah | 41 |
| Gambar 3.15 | Dimensi spesimen pengelasan | 41 |
| Gambar 3.16 | Dimensi spesimen <i>shot peening</i> | 42 |
| Gambar 3.17 | Dimensi Spesimen Pengujian Kekerasan dan Laju Korosi | 42 |
| Gambar 3.18 | Skema Penelitian | 43 |
| Gambar 3.19 | Instalasi proses <i>shot peening</i> | 44 |
| Gambar 3.20 | Diagram alir penelitian | 48 |
| Gambar 4.1 | Hasil Sambungan Las | 49 |
| Gambar 4.2 | Titik Pengujian Kekerasan Spesimen Sebelum <i>Shot Peening</i> | 49 |
| Gambar 4.3 | Titik Pengujian Kekerasan pada Setiap Variasi Lama Waktu Penembakan 50 | 50 |
| Gambar 4.4 | Grafik Persebaran Nilai Kekerasan Daerah Las | 52 |
| Gambar 4.5 | Foto Mikrostruktur Sambungan Las SMAW Pipa ASTM A106 Gr. B, (a) <i>Weld Metal</i> , (b) <i>Heat Affected Zone</i> dan (c) <i>Base Metal</i> | 53 |
| Gambar 4.6 | Grafik Pengaruh Lama Waktu Penembakan Terhadap Kekerasan Daerah HAZ | 54 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Gambar 4.7 | Grafik pengaruh variasi lama waktu penembakan terhadap laju korosi spesimen pipa ASTM A106 Gr. B | 55 |
| Gambar 4.8 | Foto makro spesimen sebelum dilakukan pengujian laju korosi | 57 |
| Gambar 4.9 | Foto makro spesimen setelah dilakukan pengujian laju korosi | 57 |
| Gambar 4.10 | Grafik polarisasi laju korosi spesimen dengan variasi lama waktu penembakan | 59 |
| Gambar 4.11 | Hasil foto <i>Scanning Electron Microscope</i> perbesaran 400x dan 1000x spesimen <i>raw material</i> dan spesimen dengan variasi lama waktu penembakan 6 menit dan 8 menit (pasca pengujian laju korosi) | 60 |
| Gambar 4.12 | Hasil foto <i>Scanning Electron Microscope</i> perbesaran 400x dan 1000x spesimen dengan variasi lama waktu penembakan 10 menit, 12 menit dan 14 menit (pasca pengujian laju korosi) | 61 |





Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 Data Sheet Komposisi Material ASTM A106 Gr. B
- Lampiran 2 Sertifikat Welder
- Lampiran 3 *Welding Procedure Specification* (WPS)
- Lampiran 4 *Data Sheet* Hasil Pengujian Kekerasan
- Lampiran 5 Hasil Analisis Kandungan Sulfur dan pH *Crude Oil* (Larutan Pengkorosi)
- Lampiran 6 Hasil Analisis Kandungan Sulfur dan pH Air Laut (Larutan Pengkorosi)
- Lampiran 7 Hasil Foto Mikrostruktur Spesimen
- Lampiran 8 Hasil *Tafel Plot* dan Laju Korosi *Raw Material*
- Lampiran 9 Hasil *Tafel Plot* dan Laju Korosi Spesimen dengan Variasi 6 Menit
- Lampiran 10 Hasil *Tafel Plot* dan Laju Korosi Spesimen dengan Variasi 8 Menit
- Lampiran 11 Hasil *Tafel Plot* dan Laju Korosi Spesimen dengan Variasi 10 Menit
- Lampiran 12 Hasil *Tafel Plot* dan Laju Korosi Spesimen dengan Variasi 12 Menit
- Lampiran 13 Hasil *Tafel Plot* dan Laju Korosi Spesimen dengan Variasi 14 Menit
- Lampiran 14 Hasil Foto *Scanning Electron Microscope Raw Material*
- Lampiran 15 Hasil Foto *Scanning Electron Microscope* Spesimen Variasi 6 Menit
- Lampiran 16 Hasil Foto *Scanning Electron Microscope* Spesimen Variasi 8 Menit
- Lampiran 17 Hasil Foto *Scanning Electron Microscope* Spesimen Variasi 10 Menit
- Lampiran 18 Hasil Foto *Scanning Electron Microscope* Spesimen Variasi 12 Menit
- Lampiran 19 Hasil Foto *Scanning Electron Microscope* Spesimen Variasi 14 Menit



Halaman ini sengaja dikosongkan

RINGKASAN

Achirul Jamhar, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juni 2021, *Pengaruh Variasi Lama Waktu Penembakan pada Proses Shot Peening terhadap Kekerasan dan Laju Korosi Sambungan Las SMAW Pipa ASTM A106 Gr. B*, Dosen Pembimbing: Teguh Dwi Widodo, ST., M.Eng. Ph.D. dan Rudianto Raharjo, ST. MT.

Penelitian ini dilaksanakan dengan tujuan mencari pengaruh lama waktu penembakan pada proses *shot peening* dan lama waktu penembakan yang paling efektif terhadap kekerasan yang diuji dengan Eseway EW-410AAT dan laju korosi diuji dengan PalmsSens pada sambungan las SMAW pipa ASTM A106 Gr. B dengan larutan pengkorosi yang digunakan adalah *crude oil* (minyak mentah). Proses shot peening dilakukan pada daerah HAZ (*Heat Affected Zone*) karena merupakan daerah pengelasan yang paling rentan terhadap korosi. Justifikasi penelitian ini dilakukan dengan cara membandingkan hasil foto makroskopik menggunakan *digital microscope* dan foto SEM (*Scanning Electron Microscope*) menggunakan Hitachi TM3000 *Scanning electron microscope*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan semakin lamanya waktu penembakan pada proses *shot peening* dapat meningkatkan kekerasan dari daerah HAZ pada spesimen dengan menghasilkan *compressive residual stress* dan dapat mengurangi atau menghambat laju korosi dari spesimen karena terjadi peningkatan kerapatan butir dari permukaan spesimen yang terkena proses *shot peening* sehingga menjadi lapisan pelindung untuk lapisan yang di dalamnya lebih tahan terhadap korosi. Namun, pada pengujian laju korosi didapatkan lama waktu penembakan yang paling efektif adalah selama 12 menit. Foto makroskopik dan SEM dalam penelitian ini juga dapat dijadikan sebagai data pendukung.

Kata Kunci: *Shot peening time*, Kekerasan, Laju korosi, ASTM A106 Gr. B.



Halaman ini sengaja dikosongkan

SUMMARY

Achirul Jamhar, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering Universitas Brawijaya, June 2020, *The effect of Shot Peening Time Variations on Shot Peening on Hardness and Corrosion Rate of ASTM A106 Gr. B Pipe SMAW Welded Joint*, Academic Advisor's: Teguh Dwi Widodo, ST., M.Eng. Ph.D. and Rudianto Raharjo, ST. MT.

This research was carried out with the aim of finding the influence of shot peening time in the shot peening process and the most effective shot peening time for the hardness tested with Eseway EW-410AAT and corrosion rate tested with PalmsSens on SMAW welded joints of ASTM A106 Gr. B pipes with the electrolyte used is crude oil. The shot peening process is carried out in the HAZ (Heat Affected Zone) area because it is the welding area that is most susceptible to corrosion. The justification for this research was done by comparing the results of macroscopic photos using a digital microscope and SEM (Scanning Electron Microscope) photos using a Hitachi TM3000 Scanning electron microscope. The results showed that the longer the shot peening time in the shot peening process could increase the hardness of the HAZ region on the specimen with produced compressive residual stress and could reduce the corrosion rate of the specimen because there is an increase in grain density from the surface of the specimen exposed to the shot peening process so that it becomes a protective layer for the layer inside which is more resistant to corrosion. However, in testing the corrosion rate, it was found that the most effective shot peening time was 12 minutes. Macroscopic and SEM photos in this study can also be used as supporting data.

Keywords: *Shot peening time, Hardness, Corrosion Rate, ASTM A106 Gr. B.*



Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dewasa ini, *crude oil* memiliki peran yang sangat penting untuk negara-negara yang memiliki kebutuhan bahan bakar yang tinggi untuk industri, listrik, ataupun untuk transportasi. *Crude oil* sangat dibutuhkan terutama dalam pengaplikasiannya pada industri yang berkontribusi untuk memproduksi energi. Perkembangan ekonomi dan pertumbuhan penduduk yang pesat tercatat dalam beberapa dekade terakhir, menyebabkan meningkatnya permintaan bahan bakar fosil. (Souas *et al.* 2020). Dengan meningkatnya permintaan tersebut maka menyebabkan adanya peningkatan juga pada distribusi dan alur transportasi dari *crude oil* menuju ke tempat produksi ataupun pengolahannya.

Dalam proses produksi dan distribusi dari *crude oil* tersebut, banyak digunakan sistem pemipaan yang digunakan sebagai alat transportasi yang sesuai dengan kebutuhannya. Sistem pemipaan adalah infrastruktur yang memiliki peran penting untuk proses transportasi minyak dan gas alam, yang menghubungkan area produksi ke kilang, pabrik kimia, konsumen, dan juga untuk kebutuhan industri. (Chen *et al.* 2020). Alat transportasi minyak dan gas dengan menggunakan pipa merupakan moda transportasi yang penting dan banyak diminati untuk minyak dan gas di lepas pantai mengacu pada nilai perekonomian yang tinggi, kedekatan udara yang tinggi, dan faktor keamanan yang tinggi. (Gong *et al.* 2020).

Salah satu jenis material dari pipa yang biasa digunakan adalah baja karbon. Baja karbon adalah bahan pipa yang paling umum digunakan pada industri listrik, industri kimia, dan industri hidrokarbon. Pipa baja karbon yang umumnya digunakan pada lingkungan uap, air ataupun udara diantaranya adalah ASTM A106 dan ASTM A53. Baja karbon dapat diklasifikasikan dengan kadar karbonnya yaitu ringan, sedang, dan tinggi. (Antaki. 2003).

Proses manufaktur yang banyak dipilih untuk membuat pipa dengan jarak yang jauh adalah dengan proses penambahan sambungan las pada pipa tersebut. Seperti yang kita ketahui bahwa di dalam proses pengelasan, terdapat berbagai parameter yang dapat mempengaruhi sifat mekanik dan mikrostruktur dari hasil sambungan las dengan logam induknya secara signifikan. (Sharma. 2020).

Setelah proses pengelasan, dapat muncul *residual stress* yang tinggi diakibatkan oleh konduktivitas termal yang rendah dan koefisien muai panas yang tinggi, yang dapat menyebabkan peningkatan kemungkinan terjadinya *Stress Corrosion Cracking* (SCC) ketika material terkena media yang bersifat korosif. (Kessal *et al.* 2019). Korosi menjadi salah satu masalah terpenting yang mempengaruhi keselamatan peralatan-peralatan pada industri minyak dan gas, kerusakan yang disebabkan oleh korosi mencapai sekitar 25% dari total semua kegagalan peralatan yang terjadi pada industri minyak dan gas. Oleh karena itu, manajemen ataupun pencegahan korosi menjadi yang terpenting bagi perusahaan-perusahaan minyak dan gas, serta standar manajemen yang harus tepat. (Wang *et al.* 2020). Selama proses produksi dan distribusi dari minyak dan gas, logam yang berperan sebagai alat transportasi dapat mengalami serangan korosi yang memiliki dampak negatif terhadap lingkungannya. Lingkungan yang dimaksud juga termasuk sistem pemipaan dan fasilitas transportasi *crude oil*. (Alamri. 2020).

Peening atau benturan adalah perlakuan yang efektif untuk mengubah tegangan sisa tarik pada permukaan, *peening* dapat menginduksi lapisan deformasi plastis dan tegangan tekan pada permukaan material. Saat ini teknik *peening* memiliki beberapa jenis, salah satunya adalah *shot peening*. (Mannens *et al.* 2018). Proses *shot peening* dikenal sebagai metode untuk memberikan tekanan pada permukaan material dengan tujuan meningkatkan kekerasan permukaan material tersebut. Udara bertekanan digunakan untuk menembakkan butiran logam berukuran kecil pada permukaan logam. Metode ini berfungsi untuk meningkatkan ketahanan material terhadap pembebanan, ketahanan *fatigue*, dan ketahanan terhadap korosi. (Mahajan *et al.* 2020). Salah satu parameter pada proses *shot peening* yang dapat mempengaruhi daerah cakupan dan intensitas dari hasil penembakan merupakan lamanya waktu penembakan yang diberikan pada spesimen uji.

Dari penjelasan yang telah dibahas, dalam hal ini penulis ingin mengetahui bagaimana pengaruh dari variasi lama waktu penembakan pada proses *shot peening* terhadap kekerasan dan laju korosi sambungan las SMAW pipa ASTM A106 Gr. B. Karena sangat bahayanya dampak dari korosi apabila terjadi pada sambungan las SMAW, maka dari itu penelitian ini harus dilakukan untuk dapat mengetahui pengaruh dari penambahan proses *shot peening* dengan memvariasikan lama waktu penembakan terhadap sambungan las SMAW pipa ASTM A106 Gr. B dalam meningkatkan kekerasan sambungan las dan meningkatkan ketahanan sambungan las terhadap korosi.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan penjelasan latar belakang penulisan, maka rumusan masalah dari penelitian ini adalah bagaimana pengaruh variasi lama waktu penembakan pada proses *shot peening* terhadap kekerasan dan laju korosi sambungan las SMAW pipa ASTM A106 Gr. B.

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terarah, penulis memberikan batasan-batasan masalah diantaranya:

1. Mesin las SMAW yang digunakan dalam kondisi tegangan listrik yang stabil.
2. Perubahan nilai temperatur yang terjadi pada saat proses pengelasan tidak diperhitungkan.
3. Parameter pengelasan yang digunakan mengacu pada WPS yang sesuai.
4. Spesimen yang digunakan dan hasil pengelasan pada penelitian dalam kondisi yang baik.
5. Parameter lain yang tidak menjadi variabel bebas, variabel terikat dan variabel terkontrol diabaikan.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dengan tujuan untuk mencari pengaruh lama waktu penembakan pada proses *shot peening* dan lama waktu penembakan yang paling efektif terhadap kekerasan dan laju korosi sambungan las SMAW pipa ASTM A106 Gr. B.

1.5 Manfaat Penelitian

1. Memberikan sebuah pemahaman dan gambaran tentang pengaruh variasi lama waktu penembakan pada proses *shot peening* terhadap kekerasan dan laju korosi sambungan las SMAW pipa ASTM A106 Gr. B.
2. Dapat digunakan sebagai referensi terkait penggunaan proses pengelasan dan *shot peening* pada industri manufaktur.
3. Menjadi referensi untuk pengembangan penelitian-penelitian terkait pengelasan, *shot peening* dan korosi selanjutnya.



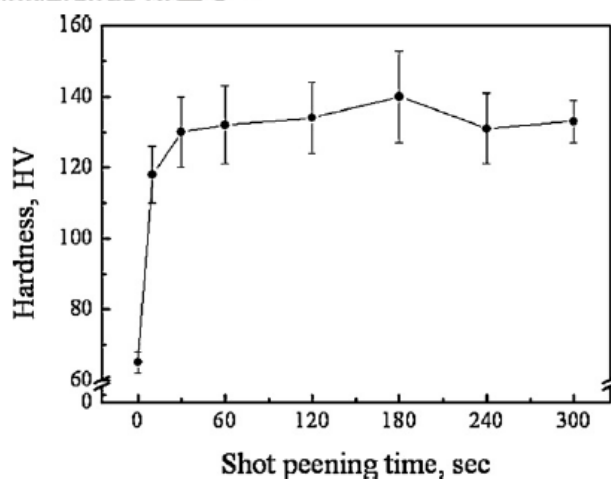
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Nasilowska *et al.* (2015) meneliti tentang pengaruh *shot peening* pada ketahanan korosi sambungan las *austenitic stainless steel* 904L yang dibuat dengan *laser welding* dan pengelasan GTAW. Bola baja yang digunakan berdiameter 0,8 mm dengan tekanan penembakan 0,5 MPa dan *peening time* selama 6 menit. Korosi terutama terjadi disekitar HAZ (*Heat affected zone*) dan didapatkan hasil pada sambungan las *laser-welding* yang telah terpapar 5% NaCl selama 1000 jam dan diberikan proses *shot peening* tidak terjadi korosi *pitting*. Pada penelitian ini, didapatkan kesimpulan bahwa dengan memberikan proses *shot peening* pada sambungan las dapat meningkatkan nilai kekerasannya secara signifikan dan mengurangi korosi sebesar 75% dibandingkan dengan spesimen tanpa proses *shot peening*.

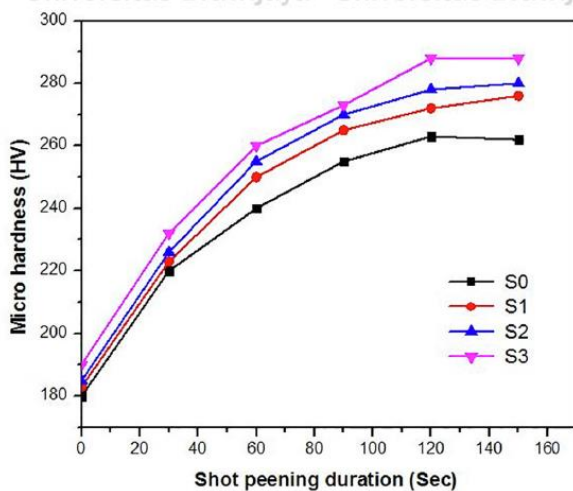
Cho *et al.* (2012) meneliti tentang *surface hardening* pada *aluminum alloy* 2024 dengan proses *shot peening* menggunakan bola Zn. Proses *shot peening* dilakukan dengan tekanan 0,3 MPa dan waktu 10 detik hingga 300 detik. Pada penelitian ini, didapatkan kesimpulan bahwa kekerasan dari spesimen meningkat dengan diberikannya proses *shot peening* akibat deformasi plastis yang terjadi pada permukaan maerial menyebabkan perbaikan struktur butir, nilai kekerasan permukaan spesimen tanpa proses *shot peening* adalah 65 HV sedangkan spesimen dengan proses *shot peening* didapatkan nilai kekerasan 140 HV dengan *peening time* selama 180 detik yang dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Grafik hasil nilai kekerasan pada *aluminum alloy* 2024 berdasarkan *peening time*.

Sumber : Cho *et al.* (2012:3)

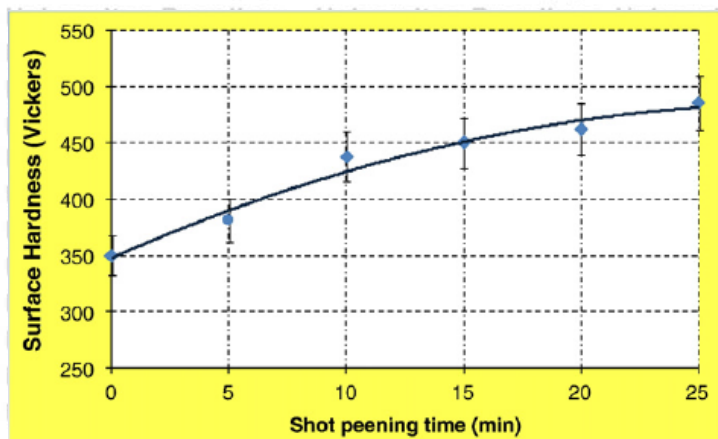
Sasikumar *et al.* (2020) meneliti tentang pengaruh proses *shot peening* terhadap *surface properties* material Al7075 hybrid aluminum metal matrix composites dengan paduan sebesar 5%, 10%, 15% dan dibandingkan dengan material murninya. Parameter *peening time* yang dipilih adalah 30-150 detik. Pada penelitian ini, didapatkan hasil bahwa kekerasan permukaan meningkat seiring dengan besarnya *peening time*. Semakin tinggi kadar paduannya juga menunjukkan bahwa dapat meningkatkan nilai kekerasan seiring semakin lamanya *peening time* seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.2, hal tersebut dapat terjadi karena proses *shot peening* menghasilkan tegangan sisa tekan pada spesimen uji.



Gambar 2.2 Grafik hasil nilai kekerasan pada komposit Al7075 berdasarkan *peening time*.

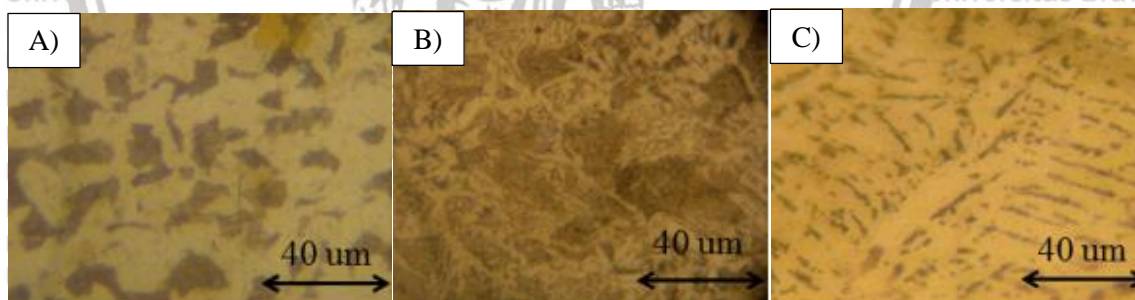
Sumber : Sasikumar. (2020:3)

Azar *et al.* (2010) meneliti tentang pengaruh dari *shot peening time* pada *stainless steel* 316L terhadap kekerasan permukaan dan ketahanan terhadap korosi *pitting*. Pada penelitian ini, didapatkan kesimpulan dengan diberikannya proses *shot peening* dapat meningkatkan kekerasan dari spesimen seiring dengan bertambahnya *peening time* ditunjukkan oleh grafik pada gambar 2.3, meningkatkan ketahanan *fatigue* secara signifikan dan meningkatkan ketahanan spesimen terhadap korosi *pitting* dengan *peening time* lebih dari 10 menit.



Gambar 2.3 Grafik hasil nilai kekerasan pada *stainless steel* 316L berdasarkan *peening time*.
Sumber : Azar *et al.* (2010:3)

Shirinzadeh-Dastgiri *et al.* (2015) meneliti tentang perilaku korosi dan investigasi metalurgi pada kegagalan sambungan las pipa baja rendah AISI 1518. Kegagalan atau *fracture* terjadi akibat adanya *cracks* pada bagian antara *weld metal* dengan HAZ dan pada bagian dalam dari pipa terpapar *pitting corrosion*. Dilakukan uji mikrostruktur dengan *optical microscope* pada seluruh daerah hasil pengelasan, diantaranya : *base metal*, *heat affected zone* dan *weld metal* seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.4. *Base metal* terdiri dari *ferrite* dan *pearlite* sesuai tipikal material baja karbon, pada HAZ terindikasi campuran *ferritic-pearlite-bainitic*, dan pada *weld metal* terdapat *martensite*, *acicular ferrite* dan *fine bainitic ferrite*. Tidak ada *cracks* yang terdeteksi pada daerah *weld metal*.



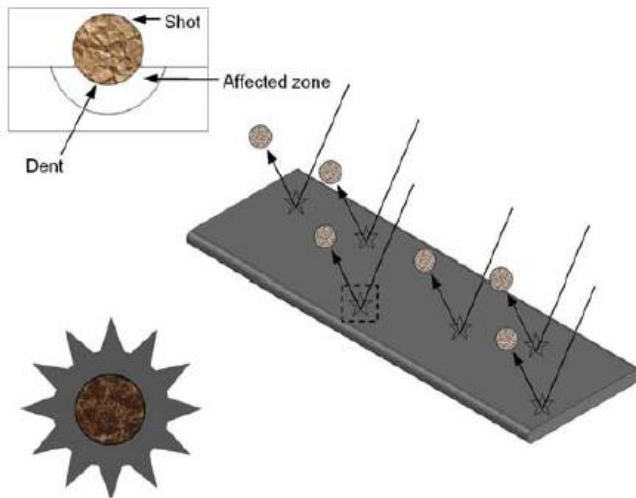
Gambar 2.4 Foto mikrostruktur A) *Base Metal*, B) HAZ (*Heat Affected Zone*), dan C) *Weld Metal*.
Sumber : Shirinzadeh-Dastgiri *et al.* (2015:82)

2.2 Shot Peening

2.2.1 Definisi Shot Peening

Shot peening merupakan salah satu proses *cold working* yang dilakukan untuk menghasilkan tegangan sisa tekan dan merubah sifat mekanik suatu logam. Pada pengaplikasiannya, *shot peening* memberikan benturan atau tembakan pada permukaan spesimen dengan kekuatan tertentu sehingga menciptakan deformasi plastis dan tegangan

sisia tekan (*compressive residual stress*) oleh benda (bola baja, kaca ataupun keramik) seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.5.



Gambar 2.5 Mekanisme *shot peening*.

Sumber : Bhuvaraghan *et al.* (2010:27)

Dengan terbentuknya deformasi plastis pada permukaan dapat mengurangi atau menghilangkan tegangan sisa tarik (*tensile residual stress*) pada area yang terkena perlakuan *shot peening* untuk menghindari kemungkinan munculnya retak akibat tegangan sisa tarik tersebut. Proses ini hampir sama dengan *sand blasting*, namun tujuan yang ingin dicapai bukanlah abrasi pada permukaannya namun deformasi plastis dan selama *shot peening* material yang terbangun dan debu yang dihasilkan lebih sedikit. (Kumar *et al.* 2013). Proses *shot peening* dapat dikontrol dengan berbagai parameter yang digunakan, hasil dari proses *shot peening* ini sangat bervariasi untuk jenis material dengan paduannya yang berbeda-beda. Distribusi dari *residual compressive stress* setelah proses *shot peening* memiliki pengaruh yang besar terhadap peningkatan kekuatan *fatigue* dari material, hal itu juga tergantung dari parameter-parameter yang digunakan pada proses *shot peening* dan juga struktur mikro dari material itu sendiri. (Bhuvaraghan *et al.* 2010:33)

2.2.2 Parameter *Shot Peening*

Dalam pengaplikasiannya *shot peening* memiliki beberapa parameter yang dapat digunakan dan menyesuaikan dengan material yang diberikan perlakuan, diantaranya :

1. Media *Shot Peening*

Kekerasan dari media yang digunakan harus lebih keras dari permukaan benda kerja yang diberi perlakuan dan dalam kondisi yang baik atau tidak terdeformasi jika telah digunakan sebelumnya. Selain itu media *shot peening* harus memiliki ukuran yang seragam, karena energi yang diberikan oleh media ini juga bergantung pada

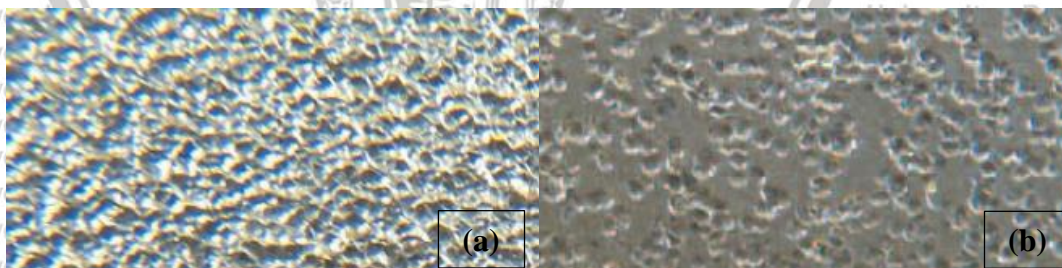
ukuran dari media tersebut. Jika media tersebut memiliki ukuran yang berbeda maka indentasi yang diciptakan pada proses *shot peening* akan berbeda ukuran, sehingga dapat menyebabkan tegangan sisa tekan yang timbul tidak seragam.

2. Intensitas *Shot Peening*

Intensitas dari *shot peening* dapat diartikan sebagai energi dari tembakan bola-bola baja yang diterima benda kerja secara berulang. Energi dari tembakan-tembakan ini sangat berpengaruh terhadap tegangan tekan pada permukaan spesimen. Intensitas dari proses penembakan ini dapat ditingkatkan dengan cara memilih diameter bola baja yang lebih besar ataupun dengan cara meningkatkan kecepatan alirannya, dengan cara tersebut intensitas dari tembakan akan meningkat dan tentunya meningkatkan tegangan tekan yang diberikan kepada benda kerja. Variabel lain yang mempengaruhi intensitas tembakan yaitu sudut penembakan dan material dari media tersebut.

3. Cakupan *Shot Peening*

Cakupan dari daerah permukaan yang terkena *shot peening* sangat mempengaruhi kualitas dari prosesnya, cakupan ini dapat dinilai dengan melihat bekas indentasi dari bola-bola baja yang ditembakkan pada permukaan benda kerja. Gambar 2.6 (a) menunjukkan contoh benda kerja dengan cakupan *shot peening* penuh dan gambar 2.6 (b) menunjukkan contoh benda kerja dengan cakupan *shot peening* belum sepenuhnya. Cakupan dari *shot peening* tidak boleh kurang dari 100% karena bagian yang tidak terdapat indentasi dapat rentan mengalami SCC (*Stress Corrosion Crack*).



Gambar 2.6 Contoh foto cakupan *shot peening* (a) cakupan penuh dan (b) cakupan belum sepenuhnya.

Sumber : MIC (2005:42)

2.2.3 Lama Waktu Penembakan

Lama waktu penembakan pada proses *shot peening* merupakan salah satu parameter yang dapat digunakan untuk melihat bagaimana pengaruh dari proses *shot peening* terhadap spesimen yang diberi perlakuan. Dengan semakin lamanya waktu penembakan, maka semakin lama spesimen uji menerima efek tempa dari proses *shot peening*. Lama

waktu penembakan juga berpengaruh terhadap cakupan dari *shot peening*, seperti dapat dilihat pada gambar 2.5(a) dengan waktu yang optimal akan menghasilkan daerah cakupan yang maksimal, dibandingkan dengan gambar 2.5(b) yang belum semua bagiannya terkena efek tempa dari *shot peening*. Menurut Sasikumar (2020), semakin lama waktu penembakan yang diberikan pada spesimen akan meningkatkan nilai kekerasannya, karena dengan semakin lama waktu penembakan akan menghasilkan *compressive residual stress* yang baik.

2.3 Kekerasan

Kekerasan yaitu salah satu sifat mekanik material. Kekerasan dapat juga dinyatakan dengan karakteristik kompleks sebagai kemampuan suatu material untuk meregangkan material lain. Kemampuan menahan goresan, kemampuan menahan deformasi elastis, dan kemampuan menahan deformasi berupa indentasi dan *rolling*. Pengujian kekerasan penting untuk dilakukan dengan tujuan untuk dapat memberikan informasi mengenai sifat dari material tersebut, terutama untuk material yang pada penggunaannya akan mengalami gesekan maka dapat dievaluasi berdasarkan hasil deformasi plastis yang terjadi setelah dilakukan pengujian kekerasan pada material tersebut. (Sari, 2018:27)

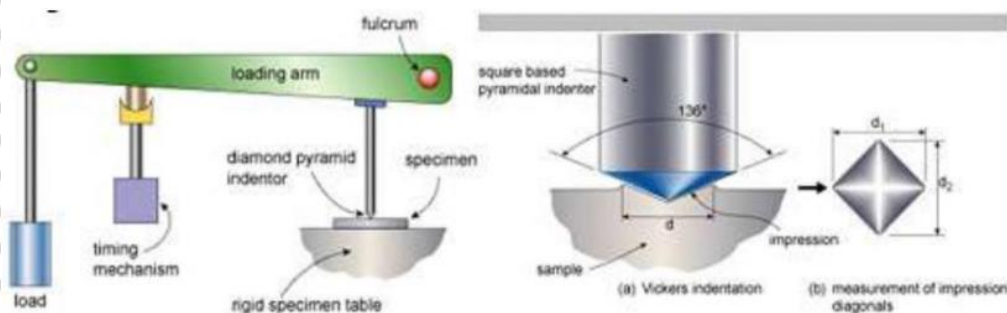
Menurut Kalpakjian (2009:68) kekerasan dapat didefinisikan sebagai ketahanan suatu material terhadap indentasi yang permanen contohnya, baja lebih keras dari aluminium, dan aluminium lebih keras dari timah. Namun, kekerasan bukan merupakan sifat dasar dari material, karena ketahanannya terhadap indentasi tergantung pada bentuk indenter yang dipakai dan besarnya beban yang diterapkan.

2.3.1 Metode-metode Pengujian Kekerasan

1. Pengujian Kekerasan Vickers

Metode Vickers merupakan salah satu jenis pengujian kekerasan. Dalam pengujian kekerasan dengan metode Vickers, indenter yang digunakan adalah intan dengan sudut antar permukaan piramidanya yang saling berhadapan adalah sebesar 136 derajat. Besar beban yang dapat diberikan dalam pengujian dengan metode Vickers adalah 1 hingga 1000 gram. Spesimen pengujian harus terlebih dahulu dipoles dan dihaluskan permukaannya untuk mendapatkan ketelitian yang baik, hasil dari pengujian akan dikonversikan ke dalam skala kekerasan Vickers dengan notasi HV.

Skema pengujian kekerasan dengan metode Vickers ditunjukkan pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Skema uji kekerasan vickers

Sumber : Sari (2018:36)

Pengujian kekerasan dengan metode Vickers memiliki tujuan untuk mengetahui kekerasan suatu material dengan menilai ketahanannya dalam menerima pembebanan pada permukaan material tersebut dari intan berbentuk piramida yang sudut puncaknya 136 derajat. Angka kekerasan Vickers (HV) diartikan sebagai hasil bagi dari beban pengujian (F) dalam satuan Newton yang dikalikan dengan angka faktor 0.102 dan luas permukaan hasil indentasi (A) dalam milimeter persegi. Secara matematis, HV sama dengan 1,854 dikalikan beban penguji (F) dibagi dengan intan diagonal yang dikuadratkan. Beban uji (F) yang biasa dipakai adalah 5 N per 0,102; 10 N per 0,102; 30 N per 0,102 N dan 50 per 0,102 N.

2. Pengujian Kekerasan Rockwell

Uji Rockwell merupakan metode paling umum yang digunakan untuk mengukur nilai kekerasan karena cara pengujiannya sangat mudah dilakukan dan tidak memerlukan keahlian khusus. Beberapa skala berbeda dapat digunakan dari kemungkinan kombinasi berbagai jenis indenter dan pemberian besar beban yang berbeda-beda, pengujian kekerasan rockwell memungkinkan untuk dilakukan pada hampir semua paduan logam termasuk beberapa jenis polimer.

Indenter yang biasanya digunakan adalah bola baja dengan diameter 1/16 in, 1/8 in, 1/4 in, 1/2 in dan intan berbentuk kerucut (brale) untuk material yang keras. Untuk besar beban yang diberikan pada pengujian kekerasan rockwell adalah 10 kg untuk beban minor, 60 kg, 100 kg dan 150 kg untuk beban mayor. Sedangkan untuk pengujian *superficial*, beban minor sebesar 3 kg dan beban mayor sebesar 10 kg, 30 kg dan 45 kg. (Callister, 2007:155)

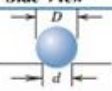









3. Pengujian Kekerasan Brinell

Uji kekerasan brinell hampir sama seperti uji kekerasan rockwell menggunakan indenter berbentuk bola baja yang dibebankan pada permukaan material yang diuji.

Diameter dari indentor bola baja adalah 10 mm, besar pembebanan standar yang diberikan adalah antara 500 kg hingga 3000 kg dengan peningkatan 500 kg selama pengujian berlangsung dan pemberian beban dipertahankan konstan dengan waktu antara 10 hingga 30 detik. Semakin keras material yang diuji, maka membutuhkan beban yang lebih besar juga.

Pengujian kekerasan brinell sudah memiliki perkembangan dimana dapat dilakukan semi-otomatis, dengan menggunakan kamera yang diletakkan tepat di atas dari bagian indentasi memungkinkan kamera tersebut untuk menangkap penampang dari hasil indentasi yang kemudian dapat ditransfer kepada komputer untuk dapat dilakukan analisis sehingga angka kekerasan brinell dapat dengan mudah ditentukan. Penggunaan teknik ini dirasa lebih efektif daripada menggunakan pengukuran manual. (Callister, 2007:158)

Perbedaan bentuk indentor, beban dan rumus dari masing-masing pengujian kekerasan ditunjukkan pada gambar 2.8.

| Test | Indenter | Shape of Indentation | | Load | Formula for Hardness Number ^a |
|-----------------------------------|--|--|--|--|--|
| | | Side View | Top View | | |
| Brinell | 10-mm sphere of steel or tungsten carbide |  |  | P | $HB = \frac{2P}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$ |
| Vickers microhardness | Diamond pyramid |  |  | P | $HV = 1.854P/d_1^2$ |
| Knoop microhardness | Diamond pyramid |  |  | P | $HK = 14.2P/l^2$ |
| Rockwell and superficial Rockwell | { Diamond cone: $\frac{1}{16}, \frac{1}{8}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}$ in. diameter steel spheres |   |   | { 60 kg 100 kg 150 kg } Rockwell { 15 kg 30 kg 45 kg } Superficial Rockwell | |

Gambar 2.8 Tabel perbedaan pengujian kekerasan

Sumber : Callister (2014:193)

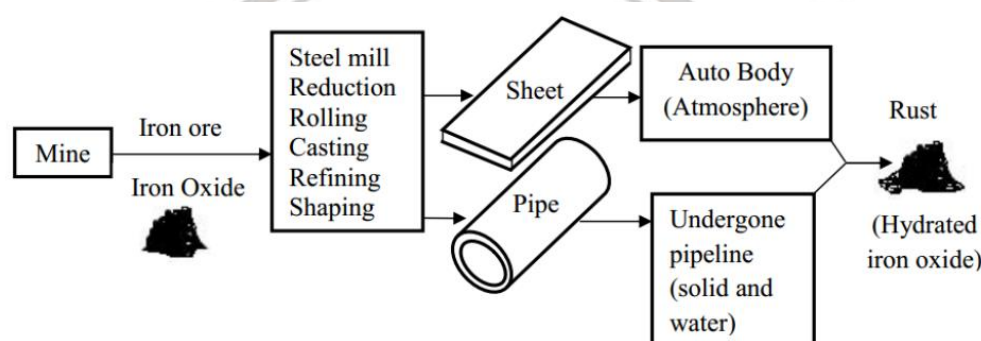
2.4 Korosi

2.4.1 Definisi Korosi

Menurut Roberge (2008:2) korosi adalah peristiwa atau fenomena perusakan dari suatu material yang umumnya dapat terjadi pada hampir semua jenis logam. Walaupun besi bukanlah jenis logam yang pertama digunakan untuk keperluan sehari-hari, besi menjadi salah satu logam yang paling sering digunakan pada saat ini dan korosi menjadi masalah

terbesar dari penggunaan logam besi tersebut. Korosi dapat menjadi penyebab dari kegagalan suatu komponen ataupun suatu infrastruktur, maka dari itu inspeksi dan pencegahan korosi harus dilakukan secara berkala.

Menurut Hidayat (2015), korosi merupakan reaksi redoks antara suatu logam dengan berbagai zat yang ada pada lingkungannya yang menyebabkan terbentuknya senyawa-senyawa yang tak diinginkan. Pada saat korosi terjadi, logam mengalami oksidasi sedangkan oksigen atau udara mengalami reduksi. Contoh korosi yang paling sering terjadi adalah perkaratan besi, karat pada suatu logam umumnya berupa oksida atau karbonat. Proses korosi cepat ataupun lambat dipengaruhi oleh lingkungan, temperatur, dan juga material dari logam itu sendiri. Ilustrasi proses pengkorosian dari suatu logam menurut penggunaannya ditunjukkan pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Ilustrasi pengkorosian logam
Sumber : Fontana (1987:4)

2.4.2 Klasifikasi Korosi

Pengklasifikasian korosi dilakukan dengan berbagai macam cara, salah satunya dengan cara membedakan antara korosi pada temperatur tinggi dan temperatur rendah. Pembagian yang sering dijumpai adalah *dry corrosion* dan *wet corrosion*.

Dry corrosion biasanya terjadi pada lingkungan yang tidak terdapat fasa cair, penyebab dari korosi temperatur tinggi ini adalah uap air dan gas-gas yang terdapat pada lingkungan tersebut. Contohnya proses korosi yang terjadi pada baja yang digunakan pada tungku pembakaran akibat sering terpapar temperatur yang tinggi. *Wet corrosion* terjadi jika terdapat fasa cair berupa cairan atau elektrolit pada proses korosi tersebut, hingga saat ini *wet corrosion* masih menjadi penyebab terbesar terjadinya korosi. Contohnya proses korosi baja oleh air. (Fontana, 1987:9)

Berikut jenis-jenis korosi yang biasanya terjadi pada pipa :

1. *Uniform Corrosion* (Korosi Seragam)

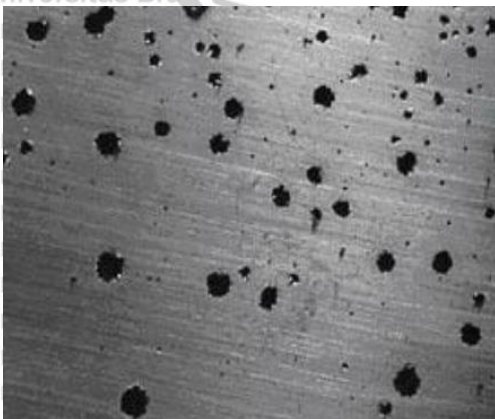
Uniform corrosion seperti ditunjukkan pada gambar 2.10 merupakan korosi yang terjadi pada permukaan logam akibat reaksi kimia karena pH air yang rendah dan kelembaban udara yang tinggi, sehingga dapat merusak permukaan logam menjadi semakin tipis. Secara umum, dikarakteristikkan oleh reaksi kimia atau reaksi elektrokimia yang menghasilkan reaksi yang sama di seluruh permukaan atau di sebagian besar area. *Uniform corrosion* biasanya ini terjadi pada pelat atau profil baja, dan juga logam homogen.



Gambar 2.10 Korosi seragam pada pipa ballast
Sumber : Utomo, (2009:138)

2. *Pitting Corrosion* (Korosi Sumur)

Pitting corrosion merupakan korosi yang disebabkan oleh komposisi logam yang tidak homogen, yang dapat menyebabkan terjadinya proses korosi menyerupai lubang atau sumur-sumur di daerah batas seperti ditunjukkan pada gambar 2.11. Jenis korosi ini sangat berbahaya karena penampakannya sangat kecil pada permukaan dari logam, sehingga beresiko tinggi terutama untuk pengaplikasian pada pipa bertekanan tinggi.



Gambar 2.11 *Pitting corrosion*
Sumber : Utomo (2009:139)

3. *Errosion Corrosion* (Korosi Erosi)

Errosion corrosion adalah jenis korosi yang terjadi akibat keausan yang menyebabkan permukaan material menjadi tajam dan kasar seperti ditunjukkan pada gambar 2.12, pada bagian – bagian ini kemungkinan terjadinya korosi lebih mudah dan juga diakibatkan oleh aliran fluida yang sangat deras lalu dapat mengikis lapisan pelindung pada logam. Jenis korosi ini biasanya muncul pada pipa dan *propeller*.



Gambar 2.12 *Errosion corrosion*

Sumber : Utomo (2009:139)

4. *Galvanic Corrosion* (Korosi Galvanis)

Galvanic corrosion seperti pada gambar 2.13 yaitu jenis korosi yang terjadi apabila terdapat 2 logam yang berbeda berada ataupun tenggelam dalam suatu larutan elektrolit, sehingga salah satu material berfungsi sebagai katoda dan yang lainnya menjadi anoda. Material yang berfungsi sebagai anoda akan lebih mudah untuk terkorosi.



Gambar 2.13 *Galvanic corrosion*

Sumber : Utomo (2009:139)

5. *Stress Corrosion Cracking*

Stress corrosion cracking ini terjadi akibat butiran logam yang berubah bentuk karena logam mengalami perlakuan khusus (seperti diregang, ditebuk dll.) sehingga butiran menerima tegangan dan butiran dari material sangat mudah bereaksi dengan lingkungan yang bersifat korosif. Contoh penampakan *stress corrosion cracking* ditunjukkan pada gambar 2.14.



Gambar 2.14 *Stress corrosion cracking*

Sumber : Utomo (2009:140)

6. *Crevice Corrosion* (Korosi Celah)

Crevice Corrosion merupakan jenis korosi yang sering terjadi pada logam yang berhimpitan dengan logam lain dan diantaranya terdapat celah yang dapat menahan kotoran dan air sehingga konsentrasi oksigen pada mulut lebih banyak dibandingkan dengan pada bagian dalam, sehingga bagian dalam bersifat anodik dan bagian mulut bersifat katodik. Contoh *crevice corrosion* dapat dilihat pada gambar 2.15.



Gambar 2.15 *Crevice corrosion*

Sumber : Utomo (2009:140)

7. Korosi mikrobiologi

Korosi ini terjadi akibat mikroorganisme yang mempengaruhi peristiwa korosi seperti bakteri, jamur, alga dan *protozoa*. Korosi mikrobiologi seperti yang

ditunjukkan oleh gambar 2.16, berpengaruh terhadap degradasi material pada suatu lingkungan. Pengaruh mikroorganisme terhadap laju korosi di suatu area umumnya berhubungan dengan proses korosi dengan cara menempel pada permukaan logam dalam bentuk lapisan tipis atau biodeposit. Pembentukan lapisan tipis atau biofilm ini saat 2 – 4 jam pencelupan sehingga lapisan ini secara visual hanya berbentuk bintik-bintik pada permukaan logam.



Gambar 2.16 Korosi mikrobiologi
Sumber : Utomo (2009:140)

8. *Fatigue Corrosion*

Fatigue corrosion seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.17 merupakan jenis korosi yang terjadi apabila suatu logam mendapatkan siklus pembebanan yang terus-menerus sampai melewati batas kekuatan dari logam tersebut, sehingga seiring berjalannya waktu logam akan mengalami patah karena terjadi kelelahan logam. Korosi ini sering muncul pada turbin uap dan *propeller* kapal.



Gambar 2.17 *Fatigue corrosion*
Sumber : Utomo (2009:141)

2.4.3 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Terjadinya Korosi

Menurut Utomo (2009), terdapat beberapa faktor yang dapat mempengaruhi terjadinya peristiwa korosi pada suatu material diantaranya :

1. Temperatur

Semakin tinggi temperatur pada suatu lingkungan maka proses reaksi kimia akan semakin cepat terjadi, yang menyebabkan kemungkinan terjadinya proses korosi akan semakin besar dan lebih cepat.

2. Kecepatan aliran

Semakin tinggi kecepatan suatu aliran yang melewati permukaan logam maka semakin cepat kemungkinan rusaknya lapisan pelindung pada logam tersebut. Dengan hilangnya lapisan pelindung tersebut maka akan mempercepat terjadinya proses korosi.

3. Keasaman (pH)

Kecepatan korosi semakin tinggi apabila terjadi pada kondisi lingkungan yang bersifat asam, yaitu dengan kondisi $\text{pH} < 7$. Hal ini dikarenakan dengan lingkungan yang asam, mikroba mampu mendegradasi logam melalui reaksi redoks.

4. Kadar oksigen dan kelembaban udara.

Semakin tinggi kadar oksigen pada suatu lingkungan maka kemungkinan terjadinya reaksi oksidasi akan semakin mudah dan air berfungsi sebagai media berlangsungnya reaksi redoks pada peristiwa korosi, sehingga akan mempengaruhi laju terjadinya reaksi korosi.

2.4.4 Laju Korosi

Laju korosi merupakan kecepatan dari penurunan kualitas suatu material terhadap waktu. Perhitungan laju korosi salah satunya adalah *mils per year* (mpy) yang dapat dihitung dari *weight loss* dari spesimen pengujian laju korosi, dengan formula sebagai berikut :

$$\text{mpy} = \frac{534W}{DAT} \dots \dots \dots (2-1)$$

Dengan : $W = \text{weight loss (mg)}$

$D = \text{density of specimen (g/cm}^3\text{)}$

$A = \text{area of specimen (sq.in)}$

$T = \text{exposure time (h)}$

Ketahanan terhadap korosi dari suatu material biasanya memiliki nilai laju korosi antara 1 – 200 mpy. Penggolongan ketahanan korosi berdasarkan nilai laju korosi suatu material dapat dilihat pada tabel 2.1.

Tabel 2.1.

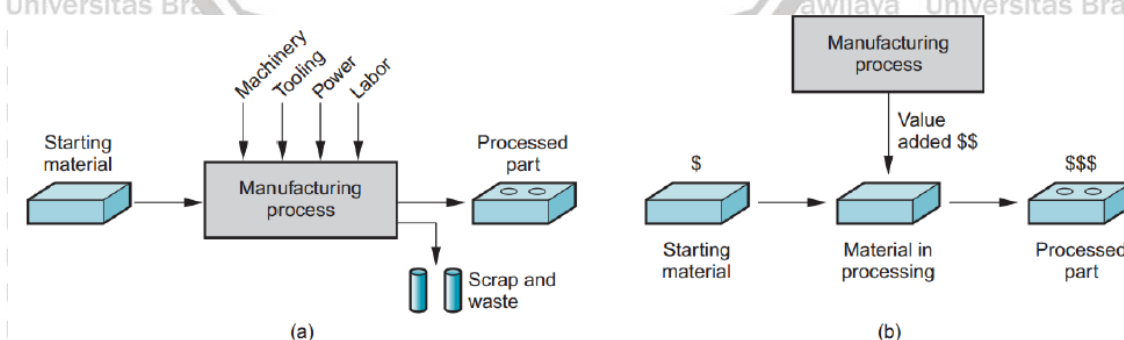
Tingkat ketahanan laju korosi dalam satuan metrik

| Ketahanan Korosi Relatif | mpy | mm/yr | $\mu\text{m/yr}$ | nm/hr | pm/sc |
|--------------------------|--------|----------|------------------|---------|--------|
| <i>Outstanding</i> | <1 | <0.02 | <25 | <2 | <1 |
| <i>Excellent</i> | 1-5 | 0.02-0.1 | 25-100 | 2-10 | 1-5 |
| <i>Good</i> | 5-20 | 0.1-0.5 | 100-500 | 10-50 | 5-20 |
| <i>Fair</i> | 20-50 | 0.5-1 | 500-1000 | 50-150 | 20-50 |
| <i>Poor</i> | 50-200 | 1-5 | 1000-5000 | 150-500 | 50-200 |
| <i>Unacceptable</i> | 200+ | 5+ | 5000+ | 500+ | 200+ |

Sumber : Fontana (1987:172)

2.5 Proses Manufaktur

Proses manufaktur dapat diartikan dengan dua cara, yaitu secara teknologi dan secara ekonomi. Secara teknologi, proses manufaktur diartikan sebagai penerapan dalam proses fisik maupun proses kimiawi yang bertujuan mengubah geometri, sifat, dan atau bentuk dari tampilan suatu bahan awal untuk menghasilkan produk atau *part* tertentu seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.18 (a). Sedangkan secara ekonomi, proses manufaktur diartikan sebagai transformasi material menjadi sebuah produk yang memiliki nilai guna yang lebih tinggi melalui satu pengerjaan atau lebih seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.18 (b). Pada intinya, proses manufaktur bertujuan untuk meningkatkan nilai guna suatu material dengan cara mengubah bentuk, sifat, ataupun mengkombinasikannya dengan material lain yang sudah diubah. Sebagai contoh, ketika minyak bumi diubah menjadi plastik atau bijih besi diubah menjadi baja, nilai guna benda tersebut bertambah. (Groover, 2010:4)



Gambar 2.18 Dua cara mendefinisikan proses manufaktur a) *Technical process* dan b) *Economic process*

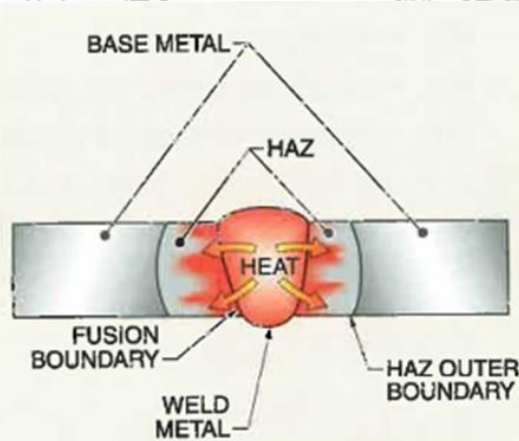
Sumber: Groover (2010:4)

2.6 Proses Pengelasan (Welding)

Menurut Jeffus (2012:5) yang mengutip dari *American Welding Society* (AWS), menjelaskan bahwa proses pengelasan (*welding*) merupakan perpaduan dari suatu material logam atau non-logam yang terjadi dengan adanya proses pemanasan material hingga mencapai temperatur pengelasan yang dibutuhkan, beberapa metode pengelasan juga membutuhkan adanya tekanan dan penambahan material *filler*. Perpaduan yang dimaksud adalah terbentuknya *fusion* atau pertumbuhan struktur butir dari material yang dilas, berlaku pada material logam ataupun non-logam karena material keramik, plastik, dll juga dapat dilas.

Fusion welding atau pengelasan fusi, dapat didefinisikan sebagai proses penggabungan material atau peleburan bersama dengan bantuan panas. *Filler* merupakan material logam yang ditambahkan ke area pengelasan saat proses pengelasan sedang berlangsung dan biasanya dilapisi *flux* yang berfungsi memperlambat ataupun menghindari proses oksidasi bagian permukaan dari logam yang dilas dengan menghasilkan gas pelindung pada zona pengelasan, sehingga dapat membantu terbentuknya sambungan las yang lebih kuat. Pengelasan fusi yang tanpa menggunakan logam *filler* biasa disebut pengelasan *autogenous*. (Kalpakjian, 2009:867)

Setelah proses pengelasan selesai, akan terbentuk beberapa daerah yang terbentuk akibat terjadinya distribusi panas selama proses pengelasan. Daerah-daerah tersebut diantaranya : *Weld Metal*, *Heat Affected Zone*, dan *Base Metal* seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.19.



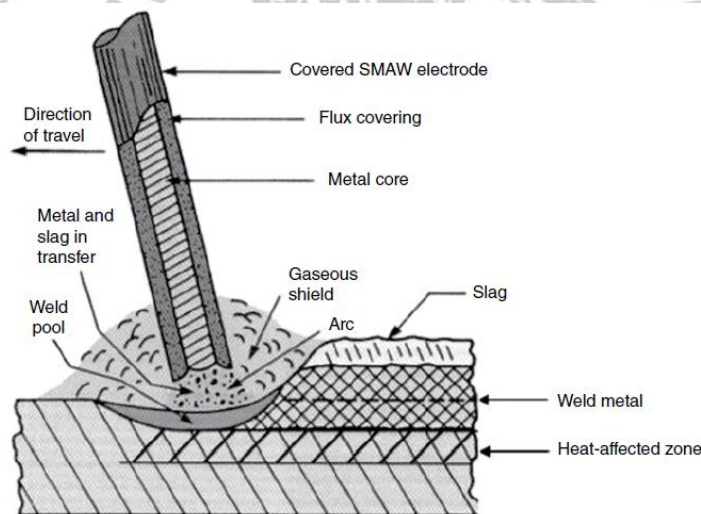
Gambar 2.19 Daerah Hasil Pengelasan
Sumber : Moniz (2004:514)

2.6.1 Macam-macam Proses Pengelasan Busur

Terdapat beberapa macam metode pengelasan busur, berikut macam-macam proses pengelasan yang mengacu pada *American Welding Society* (AWS) (Phillips, 2016:2) :

1. *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW)

Shielded Metal Arc Welding yang diilustrasikan pada gambar 2.20 merupakan proses pengelasan busur yang paling umum di seluruh dunia, pada prakteknya SMAW menggunakan elektroda yang terlindungi dan tidak memerlukan gas tambahan. Fungsi utama dari pelindung tersebut adalah untuk melindungi permukaan daerah lasan ketika terjadi proses solidifikasi dan pendinginan dengan membentuk gas pelindung CO₂, serta membuat terak pelindung yang melindungi daerah lasan. SMAW memiliki keuntungan karena biaya operasionalnya cenderung rendah, peralatannya portabel, dan sambungannya cukup kuat. Namun, dibandingkan dengan metode las busur lain seperti GMAW yang memiliki produktivitas lebih tinggi, SMAW membutuhkan kemampuan *welder* yang tinggi dan kemungkinan terjadinya cacat pengelasan yang besar pada bagian yang menjadi titik pergantian elektroda.



Gambar 2.20 *Shielded Metal Arc Welding*
Sumber : Phillips (2016:31)

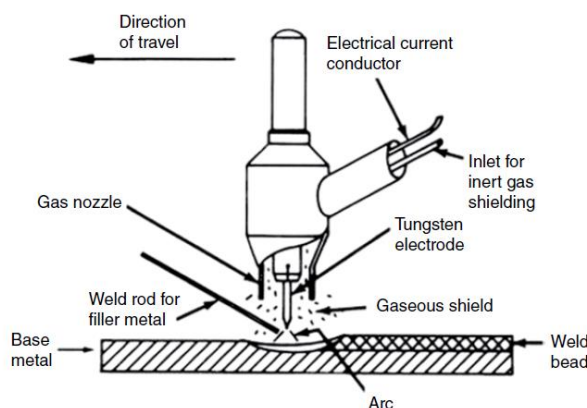
2. *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW)

Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) merupakan proses pengelasan busur dengan menggunakan elektroda berupa *tungsten* yang tidak habis pakai untuk menciptakan busur las seperti ditunjukkan pada Gambar 2.21. Karena busur dan *filler* yang terpisah, GTAW memiliki kontrol untuk masukan panas dan *weld pool* yang lebih tepat. Karena prosesnya tidak melibatkan logam pengisi cair yang melewati busur, maka tidak terdapat percikan selama proses pengelasan. Dibandingkan dengan pengelasan busur

biasanya yang menggunakan gas pelindung, proses pengelasan ini sering dianggap mampu menghasilkan pengelasan dengan kualitas terbaik diantara proses pengelasan busur yang lain.

Proses pengelasan ini dapat digunakan dengan tingkat arus yang sangat rendah dan dengan tanpa penambahan logam *filler*, GTAW dapat digunakan untuk komponen kecil yang akan bermasalah apabila panas yang dihasilkan terlalu besar. GTAW menjadi proses pengelasan yang dipilih untuk suatu perbaikan karena panas dapat dikontrol secara tepat. Contohnya perbaikan pada ujung *blade* atau retakan kecil yang terdapat pada komponen mesin turbin dari *stainless steel*, titanium atau logam paduan.

Selain itu proses pengelasan ini juga cocok untuk pengelasan pada pipa karena mudah untuk membuat *root pas* dengan kontrol panas yang tepat. Namun, GTAW memiliki kekurangan yang tidak dapat dijadikan pilihan ketika membutuhkan laju produksi yang tinggi dan juga karena gas pelindungnya berasal dari nosel yang sensitif terhadap lingkungan yang berangin.

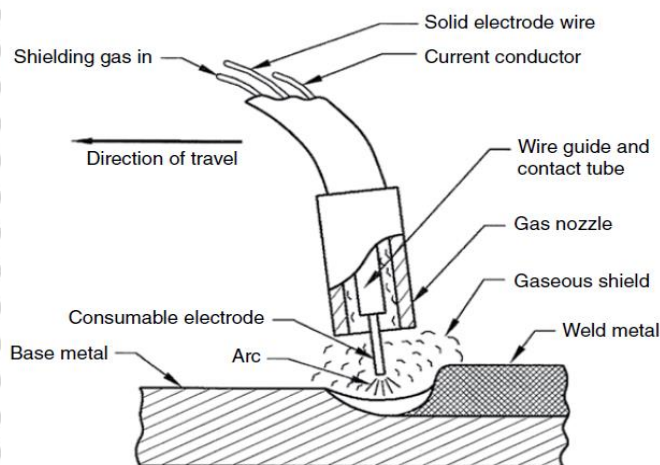


Gambar 2.21 Gas Tungsten Arc Welding
Sumber : Phillips (2016:38)

3. Gas Metal Arc Welding (GMAW)

Gas Metal Arc Welding (GMAW) seperti pada gambar 2.22 adalah proses pengelasan busur yang menggunakan elektroda kawat dalam spul yang secara terus menerus dikeluarkan dari *gun* dan kecepatan dari elektroda tersebut dapat ditentukan. Gas pelindung dari tabung keluar melalui nosel untuk menyelimuti dan melindungi logam dasar ketika memanaskan dan saat proses pendinginan. GMAW memiliki kecepatan yang tinggi dan ekonomis karena dapat menghasilkan pengelasan yang panjang dengan waktu yang singkat dan hanya memerlukan sedikit pembersihan setelah proses pengelasan. Proses ini dapat digunakan untuk mengelas logam dengan

ketebalan seperti logam lembaran hingga logam pelat berat dengan hanya sedikit merubah parameter pengelasan.

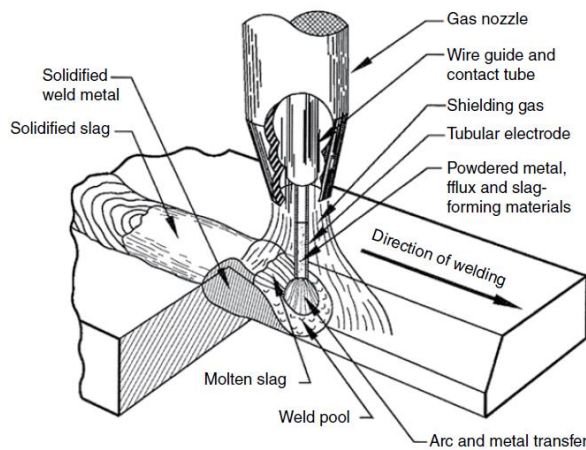


Gambar 2.22 Gas Metal Arc Welding

Sumber : Phillips (2016:50)

4. Flux Cored Arc Welding (FCAW)

Flux Cored Arc Welding (FCAW) seperti pada gambar 2.23 merupakan proses pengelasan yang sangat mirip dengan GMAW, namun menggunakan kawat tubular yang diisi dengan fluks yang dapat terdiri dari berbagai bahan seperti biji logam dan elemen paduan, fluks tersebut akan terurai membentuk gas dan meleleh untuk membentuk terak dan meminimalisir terjadinya oksidasi. Karena proses pengelasan ini fleksibel serta potensi laju deposisi yang tinggi, selain ketersediaan material *filler* yang kontinu, FCAW menjadi pilihan populer sebagai pengganti GMAW atau SMAW untuk banyak aplikasi. FCAW dapat digunakan untuk pengelasan dengan atau tanpa gas pelindung, biaya operasional sebanding dengan GMAW, namun kabel *filler*-nya lebih mahal. Pada proses FCAW besar kemungkinan munculnya asap, terutama pada model *self-shielded*.

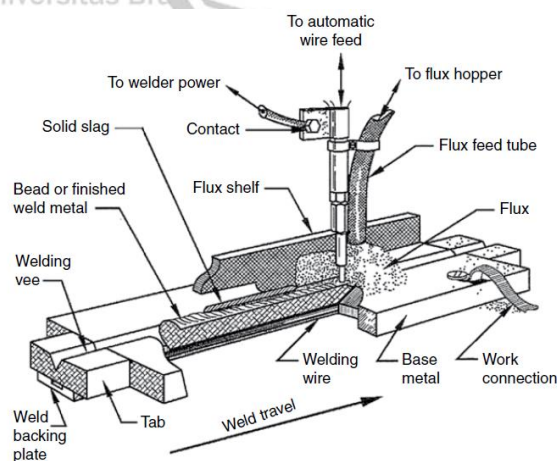


Gambar 2.23 Flux Cored Arc Welding

Sumber : Phillips (2016:60)

5. Submerged Arc Welding (SAW)

Submerged Arc Welding (SAW) seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.24 adalah proses pengelasan yang busur lasnya dilindungi oleh fluks granular yang terdiri dari kapur, silika, mangan oksida, kalsium flourida, dan senyawa lainnya. Fluks dimasukkan ke zona pengelasan dari *hopper* oleh aliran gravitasi melalui nosel. Lapisan fluks yang tebal menutupi logam cair pada seluruh bagian. Hal tersebut bertujuan untuk mencegah percikan-percikan serta menahan radiasi ultraviolet dan asap yang terbentuk dari proses SMAW. Fluks juga bertindak sebagai insulator termal dengan mendorong penetrasi panas yang dalam ke benda kerja dan fluks yang tidak terpakai dapat diolah kembali dengan perlakuan tertentu untuk digunakan kembali. Karena fluks bergerak karena gravitasi, maka proses SAW sebagian besar dibatasi pada pengelasan dalam posisi horizontal, sedangkan untuk pengelasan posisi melingkar dapat dilakukan pada pipa ataupun silinder asalkan diputar selama proses pengelasan berlangsung. (Kalpakjian, 2009:874)

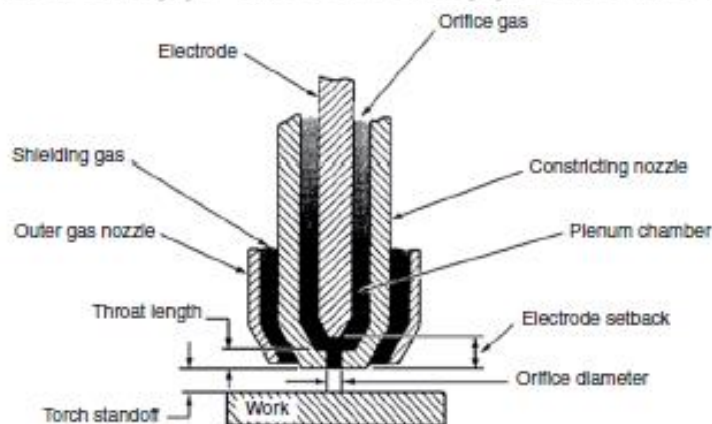


Gambar 2.24 Submerged Arc Welding

Sumber : Phillips (2016:62)

6. Plasma Arc Welding (PAW)

Plasma Arc Welding adalah proses pengelasan busur yang mirip dengan GTAW seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.25, namun pada noselnya memiliki fitur tambahan yang dikenal sebagai nosel konstriksi. Nosel konstriksi mengarahkan aliran gas melalui lubang yang memisahkan benda kerja dari elektroda tungsten. *Orifice* gasnya terionisasi untuk membentuk busur las, dengan bukaan *orifice* yang kecil, maka menghasilkan densitas energi yang lebih tinggi daripada busur GTAW. Nosel gas yang berada di luar mensuplai gas pelindung tambahan dan memiliki fungsi yang sama seperti nosel pada GTAW.



Gambar 2.25 Plasma Arc Welding
Sumber : Phillips (2016:46)

2.6.2 Parameter Pengelasan pada SMAW

Menurut Jeffus (2012:149) loncatan listrik yang melintasi celah antara busur pada ujung elektroda dengan logam yang sedang dilas biasa disebut dengan arus listrik. Arus listrik merupakan aliran elektron dan hambatan pada aliran elektron tersebut yang menghasilkan panas pada proses pengelasan. Jadi, semakin besarnya hambatan listrik, dapat menghasilkan panas dan temperatur yang semakin besar pada busur las. Udara memiliki hambatan yang tinggi terhadap aliran arus listrik, sehingga temperatur dan panas yang dihasilkan oleh busur SMAW lebih banyak.

Terdapat tiga parameter yang digunakan untuk menjelaskan arus listrik pada proses pengelasan yaitu tegangan (V), arus listrik (A), dan watt (W).

1. Tegangan atau Volts (V)

Tegangan merupakan ukuran dari tekanan listrik yang mirip dengan satuan lbf/in² dalam pengukuran tekanan air. Tegangan memiliki kontrol terhadap jarak maksimum yang dapat dilompati oleh elektron untuk membentuk busur pada proses pengelasan, jadi semakin tinggi tegangan yang digunakan dalam suatu proses

pengelasan maka elektron dapat melompati jarak yang lebih luas. Tegangan pada proses pengelasan berhubungan dengan temperatur yang dihasilkan.

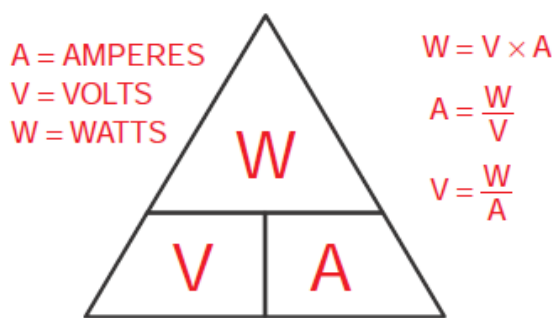
2. Ampere atau *Amps* (A)

Ampere merupakan ukuran jumlah total elektron yang mengalir. Ukuran besar dan kecilnya suatu busur yang terbentuk bergantung pada ampere yang digunakan.

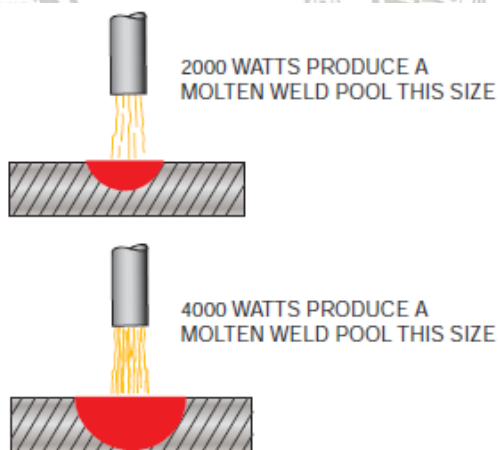
Panas pada proses pengelasan berhubungan dengan besarnya ampere.

3. Watt (W)

Watt merupakan ukuran besarnya energi listrik atau daya listrik yang berada dalam busur pengelasan. Besarnya watt dapat diketahui dengan mengalikan tegangan (V) dan ampere (A) sesuai hukum Ohm seperti yang dapat dilihat pada gambar 2.26. Besarnya watt berhubungan dengan daya pengelasan atau berapa banyak panas dan temperatur yang dihasilkan busur pada suatu proses pengelasan seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.27.



Gambar 2.26 Hukum Ohm
Sumber : Jeffus (2012:150)



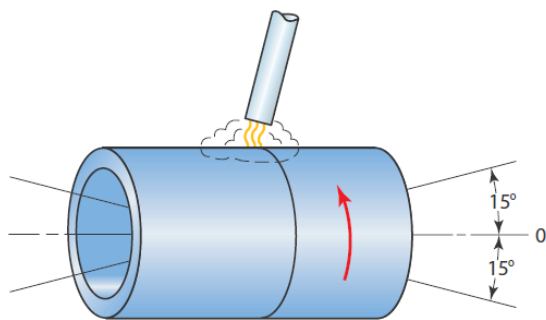
Gambar 2.27 Pengaruh besarnya watt terhadap daerah lasan
Sumber : Jeffus (2012:150)

2.6.3 Posisi Pengelasan pada Pipa

1. Posisi Horizontal 1G Pipa Berputar

Dengan posisi ini, pipa yang sedang dilas dapat diputar pada sumbu horizontal dipilih untuk kenyamanan *welder* untuk melakukan pengelasan pada pipa. Posisi ini banyak dipilih oleh banyak *welder* dan juga perusahaan karena dapat menghasilkan pengelasan dengan kualitas yang baik dan meningkatkan laju produksi, selain itu dengan posisi ini dapat memudahkan pengontrolan penetrasi dan pembuatan lapisan-lapisan pada proses pengelasannya.

Pipa dapat diputar terus menerus hingga semua bagian selesai dilas dengan beberapa jenis sudut yang bisa dipilih dan membuat visibilitas pengelasan yang baik seperti yang ditunjukkan gambar 2.28. Karena tingkat kesulitan yang tidak terlalu tinggi, maka seorang *welder* yang memiliki sertifikasi untuk posisi ini belum tentu memenuhi syarat untuk melakukan pengelasan untuk posisi yang lainnya.

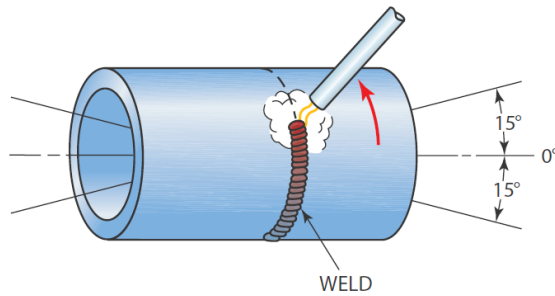


Gambar 2.28 Posisi horizontal 1G pipa berputar
Sumber : Jeffus (2012:208)

2. Posisi Horizontal 5G Pipa Tetap

Posisi pengelasan ini merupakan posisi pengelasan pipa yang paling sering digunakan dengan. Pengelasan yang dilakukan pada pipa horizontal dibuat dengan posisi datar, vertikal ke arah atas atau bawah dan *overhead* dengan sudut kemiringan dari pipa harus dibawah 15° pada sumbu horizontal seperti ditunjukkan pada gambar 2.29.

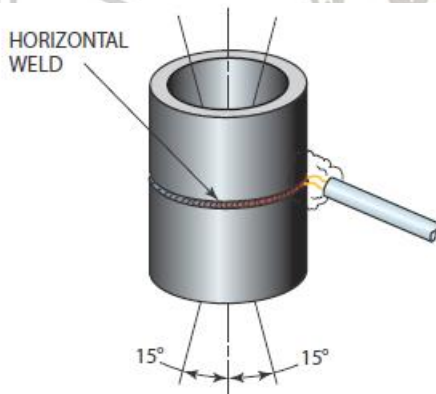
Dengan posisi horizontal 5G pipa tetap, pengelasan dapat dilakukan dengan *uphill* atau *downhill*, pembuatan *root pass* pada sambungan pipa biasa anyarah pengelasan mengikuti standar yang ada. Untuk bukaan *root* yang memiliki jarak dekat dapat dilas *uphill* atau *downhill*, namun untuk bukaan *root* yang lebar atau tidak seragam harus menggunakan metode *uphill*.



Gambar 2.29 Posisi horizontal 5G pipa tetap
Sumber : Jeffus (2012:211)

3. Posisi Vertikal 2G Pipa Tetap

Dengan posisi vertikal 2G pipa tetap, pengelasan ke arah horizontal dan pipa di arah vertikal dengan posisi yang tetap seperti pada gambar 2.30. Pengelasan dengan posisi ini membuat *welder* tidak perlu terus merubah posisi pengelasan, namun akan terdapat kesulitan apabila bagian belakang pipa yang dilas berada pada pada suatu sudut ruangan. Maka dari itu dibutuhkan kemampuan yang baik dari *welder* untuk dapat melakukan pengelasan pada kondisi-kondisi yang sulit tersebut. Sudut kemiringan pipa yang dianjurkan sama seperti posisi yang lain yaitu sekitar 15°.



Gambar 2.30 Posisi vertikal 2G pipa tetap
Sumber : Phillips (2012:219)

2.7 Carbon Steel

Menurut Kalpakjian (2009:138) baja karbon dapat diklasifikasikan menjadi tiga kelompok menurut proporsi berat (dalam%) kandungan karbonnya:

1. Baja karbon rendah

Mengandung kurang dari 0,30% karbon dan merupakan jenis baja yang paling banyak digunakan hingga saat ini. Contoh produknya seperti baut, mur, logam lembaran, pelat, dan tabung. Baja jenis ini relatif mudah dibentuk, maka tidak

memerlukan kekerasan yang terlalu tinggi. Baja tuang juga termasuk dalam material dengan kadar karbon kisaran ini.

2. Baja karbon menengah

Memiliki kandungan karbon antara 0,30% dan 0,60% yang ditentukan untuk penggunaan yang membutuhkan kekuatan lebih tinggi daripada baja dengan kadar karbon rendah. Penggunaannya untuk komponen mesin dan suku cadangnya seperti *gears*, poros engkol dan *connecting rods*

3. Baja karbon tinggi

Mengandung karbon dengan kadar lebih dari 0,60%. Penggunaannya ditentukan untuk aplikasi yang membutuhkan kekuatan, ketahanan aus dan kekerasan yang lebih tinggi. Contoh penggunaannya yaitu material untuk pegas, alat pemotong, serta suku cadang yang diharuskan tahan terhadap keausan. Setelah menjadi produk, biasanya diberi perlakuan panas dan dikeraskan.

Meningkatkan kadar karbon akan membuat baja menjadi lebih keras, namun keuletannya berkurang. Selain itu, baja karbon tinggi dapat diolah untuk membentuk martensit dengan menambahkan *heat treatment* kepada material tersebut dan akan membuat baja menjadi sangat keras dan kuat.

2.7.1 Pipa ASTM A106

Pipa ASTM A106 (juga dikenal sebagai pipa ASME SA106) merupakan spesifikasi standar untuk pipa *seamless* dengan material baja karbon untuk penggunaan pada suhu dan temperatur tinggi. Penggunaan yang paling umum dalam konstruksi kilang minyak dan gas, pembangkit listrik, pabrik bahan kimia, *boiler* dan konstruksi kapal dengan sistem perpipaan yang harus mengangkut cairan dan gas. Pipa jenis ini cocok untuk menerima perlakuan *bending*, *flanging*, *forming* dan juga pengelasan.

Pipa ASTM A106 memiliki tiga *grade* yang memiliki perbedaan pada kadar karbon maksimalnya yaitu *grade A* (0,25%), *grade B* (0,30%) dan *grade C* (0,35%). Yang paling banyak digunakan adalah ASTM A106 *grade B* dan memiliki kesetaraan komposisi kimia dan sifat mekanis dengan ASTM A53 *grade B* dan API 5L B.

2.8 Minyak Mentah

Minyak mentah didapatkan dengan cara mengebor sumur dengan kedalaman tertentu lalu memompa minyak tersebut dan memindahkannya ke kilang untuk dilakukan proses

penyulingan dengan berbagai macam metode sehingga menjadi produk. Minyak mentah dapat diklasifikasikan dalam berbagai kategori diantaranya :

1. *Light and heavy crude oil*, berdasarkan densitas dari minyak tersebut.
2. *Sweet and sour crude oil*, berdasarkan kandungan sulfur yang terdapat pada minyak tersebut, *sour crude oil* memiliki sulfur lebih dari 0,5%.
3. *Conventional and unconventional crude oil*, berdasarkan perbedaan metode ekstraksi dengan cara yang tradisional dan dengan cara ekstraksi yang lebih canggih (membutuhkan beberapa proses tambahan). (Ibrahim *et al.* 2019)

Minyak mentah merupakan campuran organik dari beberapa komponen hidrokarbon yaitu *Saturates, Aromatics, Resins and Asphaltenes* (SARA). Viskositas dari suatu minyak berkaitan dengan struktur kimia, komposisi dari komponen polar (*resins* dan *asphaltenes*) dan komposisi dari komponen non-polar (*saturates* dan *aromatics*). Adanya heteroatom (nitrogen, sulfur, oksigen) dan logam (nikel, besi, vanadium) membuat *asphaltene* menjadi *polycyclic aromatic hydrocarbon* (PAH) yang paling polar sehingga dapat menyebabkan peningkatan pada viskositas. (Anto *et al.* 2020).

2.9 Hipotesis

Berdasarkan tinjauan pustaka yang telah dibahas, pada penelitian ini dapat dibuat hipotesis bahwa nilai kekerasan pada sambungan las SMAW pipa ASTM A106 Gr. B akan meningkat seiring dengan semakin lamanya waktu penembakan pada proses *shot peening*. Hal ini dikarenakan tegangan sisa tarik akibat proses pengelasan dapat direduksi dengan terbentuknya deformasi plastis yang terjadi selama proses *shot peening*, sehingga terdapat tegangan sisa tekan pada *coverage area* dari proses *shot peening* yang dapat memperbaiki struktur mikro dari material. Perbaikan struktur mikro dari material akibat proses *shot peening* tersebut dapat meningkatkan ketahanan material terhadap korosi, maka dengan semakin lamanya waktu penembakan pada proses *shot peening* dapat menurunkan laju korosi dari material.

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan tujuan untuk mengetahui bagaimana pengaruh dari variasi lama waktu penembakan pada proses *shot peening* terhadap kekerasan dan laju korosi sambungan las SMAW pipa ASTM A106 Gr. B sebagai alat transportasi minyak mentah.

3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

1. Proses Pengelasan

Dilaksanakan pada Maret 2021 di LPKS Kampuh *Welding* Indonesia (Jl. Sawo VI No. 28 Sambikerep, Surabaya)

2. Proses *Shot Peening*

Dilaksanakan pada Maret 2021 di Laboratorium Pengecoran Logam Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

3. Pengujian Kekerasan

Dilaksanakan pada Maret - Mei 2021 di Laboratorium Teknik Mesin Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Malang.

4. Foto Mikrostruktur

Dilaksanakan pada Maret 2021 di Laboratorium Teknik Mesin Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Merdeka Malang.

5. Pengujian Laju Korosi

Dilaksanakan pada April 2021 di Laboratorium Pengecoran Logam Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

6. Foto *Scanning Electron Microscope* (SEM)

Dilaksanakan pada Juni 2021 di Laboratorium Biologi Universitas Muhammadiyah Malang.

3.3 Variabel Penelitian

Terdapat 3 variabel yang digunakan pada penelitian ini yaitu :

1. Variabel bebas (*independent variable*)

Variabel bebas merupakan variabel yang besarnya dipilih sendiri oleh peneliti sehingga didapatkan hasil variabel terikat. Variabel bebas yang digunakan dalam penelitian ini adalah perbandingan sebelum dan sesudah proses *shot peening* dengan waktu penembakan : 6 menit, 8 menit, 10 menit, 12 menit dan 14 menit.

2. Variabel terikat (*dependent variable*)

Variabel terikat merupakan variabel yang nilainya tergantung dari variabel bebas, variabel terikat yang diamati yaitu :

- Nilai kekerasan
- Laju Korosi

3. Variabel terkontrol (*control variable*)

Variabel terkontrol merupakan variabel yang nilainya telah ditentukan dan dijaga konstan selama penelitian, variabel terkontrol yang digunakan yaitu :

- Parameter pengelasan (WPS) : Arus (50-80 A) dan Voltage (19-25 V)
- Posisi pengelasan : 5G
- Diameter *shot ball* 3 mm
- Sudut penembakan 90°
- Tekanan pada kompresor sebesar 8 bar
- Jarak antara *spray gun* dengan spesimen 6 cm
- Larutan pengkorosi minyak mentah

3.4 Alat dan Bahan Penelitian

1. Mesin Las

Mesin las yang ditunjukkan Gambar 3.1 merupakan salah satu jenis mesin las busur yang digunakan untuk proses *welding* pada pipa ASTM A106 Gr. B dalam penelitian ini.



Gambar 3.1 Mesin las ESAB *Fabricator 500P*
 Sumber: LPKS Kampuh Welding Indonesia

Berikut spesifikasi dari mesin las ESAB *Fabricator 500P* :

- *Dimension (PxLxT) (mm)* : 785 x 330 x 666 mm
- *Weight (Kg)* : 59 Kg
- *Current Range (A)* : 30 – 500 A
- *Efficiency at Max. Current* : 91 %
- *Max. Output (A)* : 500 A
- *Max. Output (V)* : 40 V
- *Open Circuit Voltage (V)* : 86 V
- *Power Factor at Max. Current* : 0.92
- *Protection Glass* : IP23
- *Voltage Range (V)* : 15.5 – 50 V

2. *Spray Gun*

Alat pada Gambar 3.2 merupakan *spray gun* yang digunakan untuk menembakkan *steel ball* ke permukaan dari spesimen.



Gambar 3.2 Spray gun

Diameter nozzle : 6 mm

Diameter suction : 14 mm

3. Kompresor

Kompresor seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.3 digunakan untuk memberikan udara bertekanan pada *nozzle* dari *spray gun* pada saat proses *shot peening* sedang berlangsung.



Gambar 3.3 Kompresor

Sumber : Laboratorium Pengecoran Logam Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya (2021)

Berikut spesifikasi dari kompresor yang digunakan pada penelitian ini:

- Nama : MAHLE Druckluft D-7012 Fellbach th. 1990
- Kapasitas Maksimum Tabung : 350 L
- Tekanan Maksimum : 11 bar
- Tenaga Mesin : 3.0 kW

4. Stopwatch

Stopwatch seperti pada gambar 3.4 merupakan alat yang digunakan untuk menghitung waktu penembakan pada proses *shot peening*.



Gambar 3.4 Stopwatch

Sumber: Laboratorium Pengecoran Logam Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya (2021)

5. Mesin Uji Kekerasan Eseway EW-410AAT

Alat seperti ditunjukkan oleh Gambar 3.5 digunakan untuk melakukan pengujian kekerasan material.

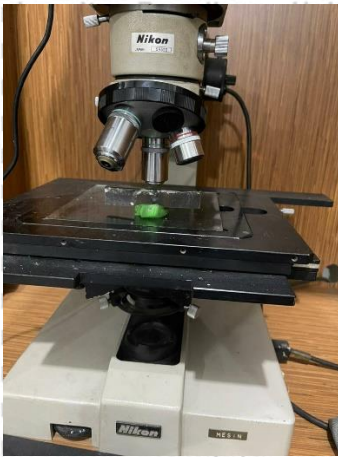


Gambar 3.5 Mesin Uji Kekerasan Eseway EW-410AAT

Sumber : Laboratorium Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Malang (2021).

6. Mikroskop Optik

Gambar 3.6 merupakan alat untuk mengambil foto mikrostruktur spesimen.



Gambar 3.6 Mikroskop optik Nikon 59525

Sumber : Laboratorium Teknik Mesin Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Merdeka Malang (2021)

7. *Scanning Electron Microscope*

Gambar 3.7 merupakan alat untuk melakukan *Scanning Electron Microscope*.



Gambar 3.7 Hitachi TM3000 *Scanning electron microscope*

Sumber: Laboratorium Sentral Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Malang (2021)

8. *Digital Microscope*

Alat seperti yang ditunjukkan oleh gambar 3.8 digunakan untuk mengambil gambar berupa foto makro dari spesimen.



Gambar 3.8 *Digital microscope*

Sumber : Laboratorium Pengecoran Logam Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya (2021)

Berikut spesifikasi dari *Digital Microscope* :

- *Image* : CMOS sensor
- *Focus Range* : 0 mm – 40 mm
- *Video Capture Resolution* : (0.3 – 5) M
- *Frame Rate* : 30 f/s under 600 LUX Brightness
- *Product Dimension* : 112 mm (L) x 33 mm (R)
- *Product Net Weight* : 380g

9. *Potentiosat/Galvanostat Instrument*

Alat yang ditunjukkan oleh Gambar 3.9 digunakan untuk menghitung laju korosi dari spesimen yang diuji.



Gambar 3.9 *Potentiosat/Galvanostat Instrument*

Sumber : Laboratorium Pengecoran Logam Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya (2021)

Measurement Specification :

- *Potential Range* : -5 V sampai +5V
- *Step Potential* : 0,076 mV sampai 250 mV
- *Pulse Potential* : 0,076 mV sampai 250 mV

General Specification

- *dc-potential range* : 10V atau ($\pm 5V$)
- *Compliance Voltage* : 10V
- *Max.current* : 30 mA
- *Max Acquisition range* : 150 data points/s

Potentiostat

- *applied dc-potential resolution* : 76.3 μV
- *applied potential accuracy* : $\leq 0.1\% \pm 1 \text{ mV offset}$
- *current ranges* : 100 pA to 10 mA (9 ranges)
- *current accuracy* : $\leq 0.1\%$ (at Full Scale Range)
- *measured current resolution* : 0.005 % of current range (5 fA on 100 pA range) 0.0025% of 10 mA range

10. Pipa ASTM A106 Gr. B

Gambar 3.10 merupakan Pipa ASTM A106 Gr. B yang digunakan sebagai *workpiece* untuk penelitian ini. Komposisi kimia dari Pipa ASTM A106 Gr. B ditunjukkan pada

Tabel 3.1.

Mechanical Properties

Tensile Strength : 480 MPa.

Yield Strength : 295 MPa.

Elastic Modulus : 190 – 210 GPa.

Hardness : 21 HRC

Tabel 3.1

Komposisi Kimia Material Pipa ASTM A106 Gr. B

| C (%) | Si (%) | Mn (%) | P (%) | S (%) | Cr (%) | Ni (%) | Cu (%) | Mo (%) |
|-------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 0.20 | 0.21 | 0.41 | 0.025 | 0.011 | 0.018 | 0.04 | 0.011 | 0.001 |

Sumber : LPKS Kampuh Welding Indonesia



Gambar 3.10 Spesimen pipa ASTM A106 Gr. B
Sumber : LPKS Kampuh Welding Indonesia

11. Elektroda

Gambar 3.11 merupakan elektroda AWS E7016 yang dipakai pada proses pengelasan dalam penelitian ini.



Gambar 3.11 Elektroda
Sumber : LPKS Kampuh Welding Indonesia

Spesifikasi dari elektroda ASW E7016 adalah sebagai berikut :

- **Diameter (mm)** : 2,5 mm
- **Current (A)** : 60 – 90 A
- **Chemical Composition** : Ditunjukkan pada tabel 3.2.

Tabel 3.2
Komposisi Kimia Elektroda AWS E7016

| C (%) | Mn (%) | Si (%) | S (%) | P (%) |
|--------|---------|--------|---------|---------|
| ≤ 0.12 | 0.3-0.6 | ≤ 0.35 | ≤ 0.035 | ≤ 0.040 |

12. Gerinda Tangan

Gerinda tangan ditunjukkan oleh Gambar 3.12 digunakan sebagai alat untuk membuat kampuh pengelasan dan merapikan hasil pengelasan.



Gambar 3.12 Gerinda Tangan

Sumber : LPKS Kampuh Welding Indonesia

13. Shot Ball

Shot ball seperti yang ditunjukkan oleh gambar 3.13 digunakan sebagai bola untuk memborbardir permukaan spesimen pada proses *shot peening* dengan *material steel hardened* diameter 3 mm yang komposisi dan sifat mekaniknya sesuai dengan standar JIS G 4805.



Gambar 3.13 Shot ball

Sifat mekanik dari Shot Ball yang dipakai adalah sebagai berikut :

Density : 7,8 g/cm³

Hardness : 850 HV

Young Modulus : 207 GPa

Poisson's Ratio : 0,30

Tabel 3.3
Komposisi Kimia *Shot Ball*

| C (%) | Mn (%) | Si (%) | S (%) | P (%) | Cr (%) |
|----------|-------------|-----------|---------------|---------------|-----------|
| 0.95-1.0 | ≥ 0.50 | 0.15-0.35 | ≥ 0.0025 | ≥ 0.0025 | 1.30-1.60 |

14. Minyak Mentah

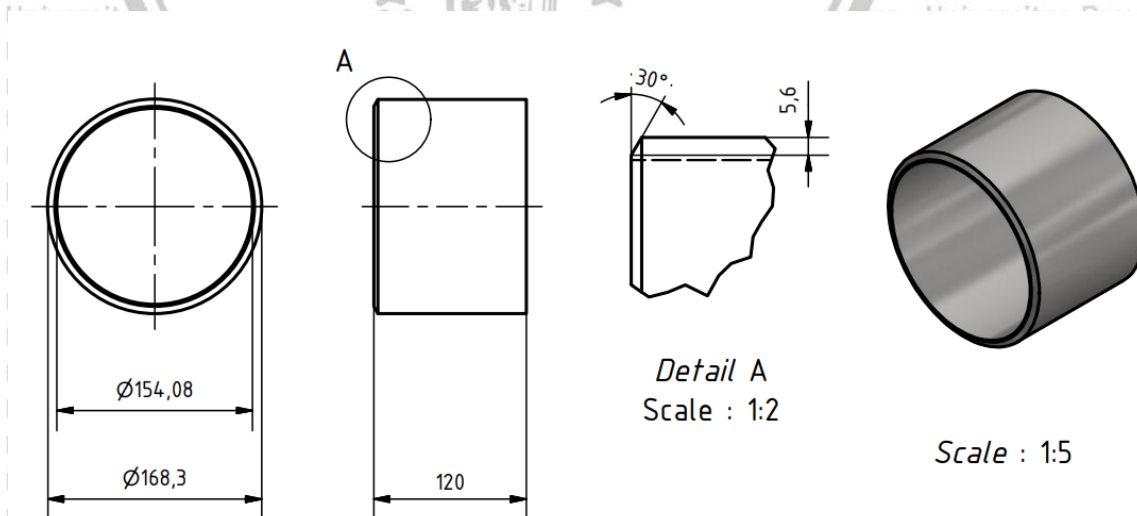
Pada Gambar 3.14 merupakan minyak mentah yang digunakan sebagai media pengkorosi pada penelitian ini.



Gambar 3.14 Minyak mentah

3.5 Dimensi Spesimen

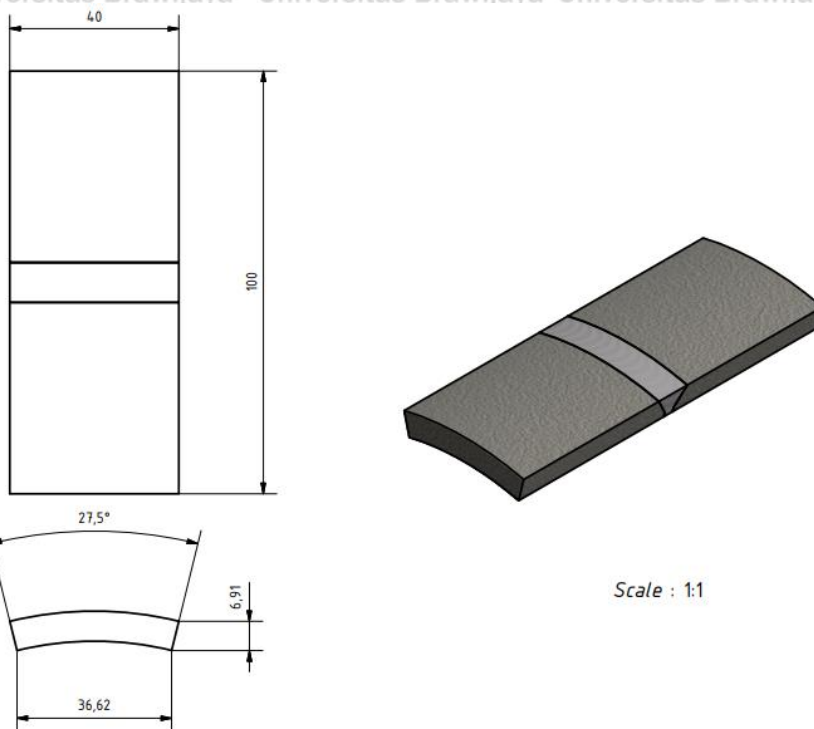
1. Dimensi Spesimen Pengelasan



Gambar 3.15 Dimensi spesimen pengelasan

Gambar 3.15 merupakan dimensi spesimen untuk proses pengelasan dalam satuan mm.

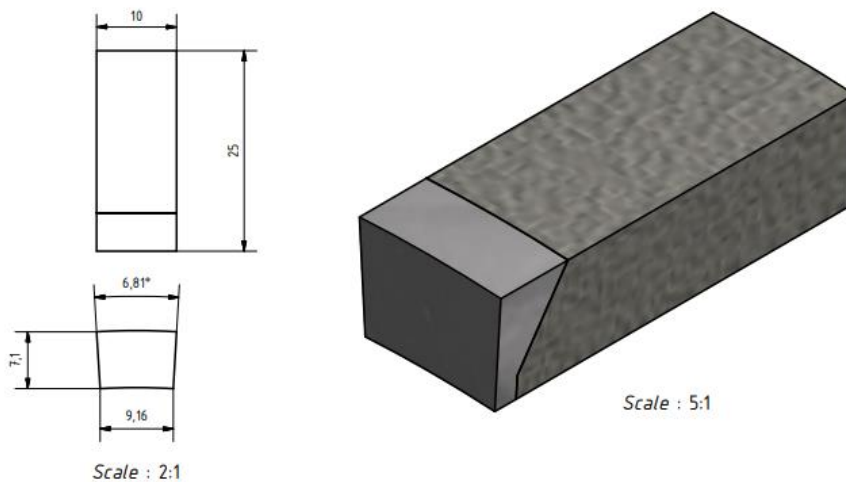
2. Dimensi Spesimen *Shot Peening*



Gambar 3.16 Dimensi Spesimen *shot peening*

Gambar 3.16 merupakan dimensi spesimen untuk proses *shot peening* dalam satuan mm.

3. Dimensi Spesimen Pengujian Kekerasan dan Laju Korosi

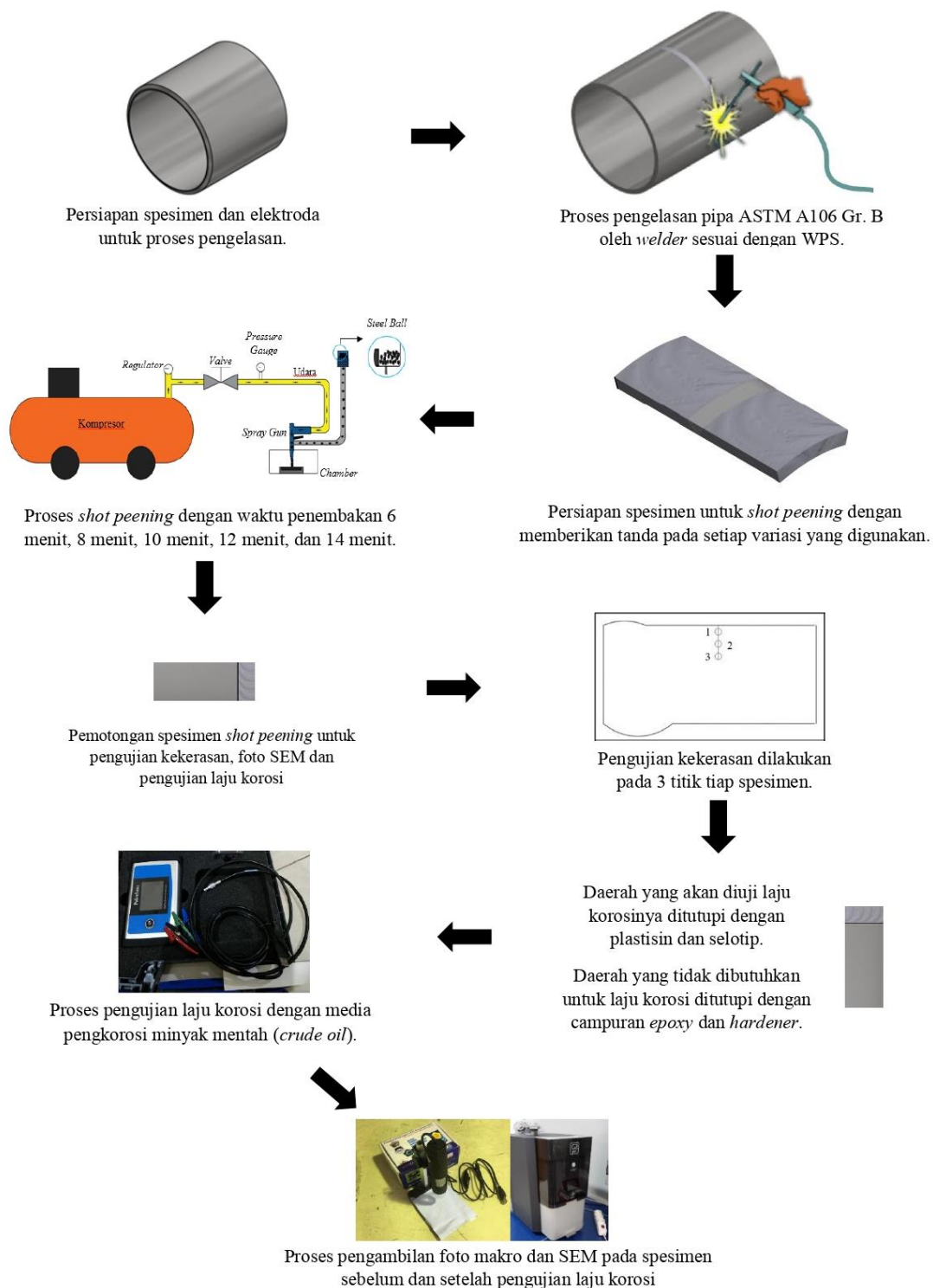


Gambar 3.17 Dimensi Spesimen Pengujian Kekerasan dan Laju Korosi

Gambar 3.17 merupakan dimensi spesimen untuk pengujian kekerasan dan laju korosi dalam satuan mm.

3.6 Skema Penelitian

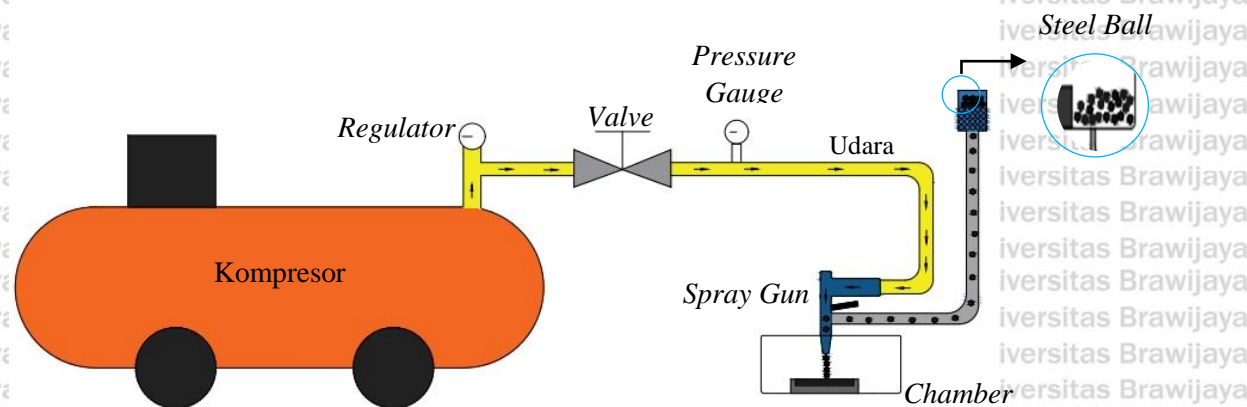
Gambar 3.18 merupakan skema alur penelitian mulai dari persiapan spesimen pengelasan hingga foto makro dan SEM.



Gambar 3.18 Skema penelitian

3.6.1 Instalasi Proses Shot Peening

Instalasi proses *shot peening* yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.19. Kompresor digunakan untuk menghasilkan tekanan yang diatur dengan *regulator* sesuai variabel yang dipilih dengan melihat nilai pada *pressure gauge*. Aliran udara dari kompresor akan menghasilkan perbedaan tekanan sehingga terjadi efek vakum yang dapat menghisap *steel ball* dari dalam *chamber* melalui selang hisap. Sehingga, *steel ball* yang masuk pada selang hisap akan meluncur ke dalam *chamber* melalui *spray gun* dan akan menghantam permukaan specimen yang dicekam dengan ragum.



Gambar 3.19 Instalasi proses *shot peening*

3.7 Prosedur Penelitian

Langkah-langkah yang dilakukan pada penelitian ini adalah :

Melakukan proses pengelasan pada pipa ASTM A106 Gr. B, dengan memposisikan pipa untuk pengerjaan dengan posisi pengelasan 5G, lalu memasang elektroda pada tang penjepit, dan mengatur parameter pengelasan sesuai dengan WPS. Setelah proses pengelasan selesai, specimen dipotong untuk dijadikan specimen uji kekerasan dan specimen *shot peening* seperti pada gambar 3.16. Lalu melakukan uji kekerasan pada hasil sambungan las, dilanjutkan dengan pengambilan foto mikrostruktur daerah hasil pengelasan dengan *digital microscope* sebagai data pendukung hasil pengujian kekerasan pada hasil sambungan las. Selanjutnya, mempersiapkan proses *shot peening* dengan menghubungkan *spray gun* dengan kompresor, memasukkan *steel ball*, menyiapkan *stopwatch* dan memasang specimen pada ragum di dalam *chamber*. Lalu mulai melakukan proses *shot peening* pada daerah HAZ specimen dengan jarak 6 cm, tekanan 8 bar dan memvariasikan waktu penembakan yaitu selama 6 menit, 8 menit, 10 menit, 12 menit, dan 14 menit. Setelah proses *shot peening*, specimen dari masing-masing variasi lama waktu penembakan dipotong dengan gergaji tangan menjadi ukuran 2,5 x 1 (cm) untuk pengujian

kekerasan dan pengujian laju korosi, dibandingkan dengan spesimen tanpa *shot peening*. Selanjutnya, melakukan pengujian kekerasan dengan Eseway EW-410AAT pada spesimen yang telah selesai proses *shot peening* dan pada tanpa proses *shot peening*. Lalu melakukan foto makro menggunakan mikroskop digital pada spesimen sebelum pengujian laju korosi. Selanjutnya, melapisi bagian dari spesimen yang tidak ikut diuji laju korosinya dengan menggunakan *araldite epoxy adhesive* yang tercampur dengan *hardener* dengan perbandingan 1:1. Sedangkan untuk daerah yang akan diuji korosi plastisin lalu dilapisi *tape* supaya tidak ikut terlapisi dengan *epoxy adhesive*, setelah kering lepas *tape* pada bagian spesimen yang dijadikan area untuk uji laju korosi. Lalu dimulai untuk pengujian laju korosi pada masing-masing spesimen dengan menggunakan larutan elektrolit berupa minyak mentah. Setelah pengujian laju korosi selesai, diambil foto makro pada spesimen setelah pengujian laju korosi yang selanjutnya dapat dibandingkan dengan foto makro spesimen sebelum pengujian laju korosi. Langkah berikutnya adalah mengambil foto *scanning electron microscope* pada spesimen pasca uji laju korosi sebagai data pendukung hasil pengujian laju korosi. Langkah yang terakhir yaitu mengumpulkan seluruh data dari masing-masing pengujian yang dilakukan, kemudian dapat menarik kesimpulan dari data yang diperoleh.

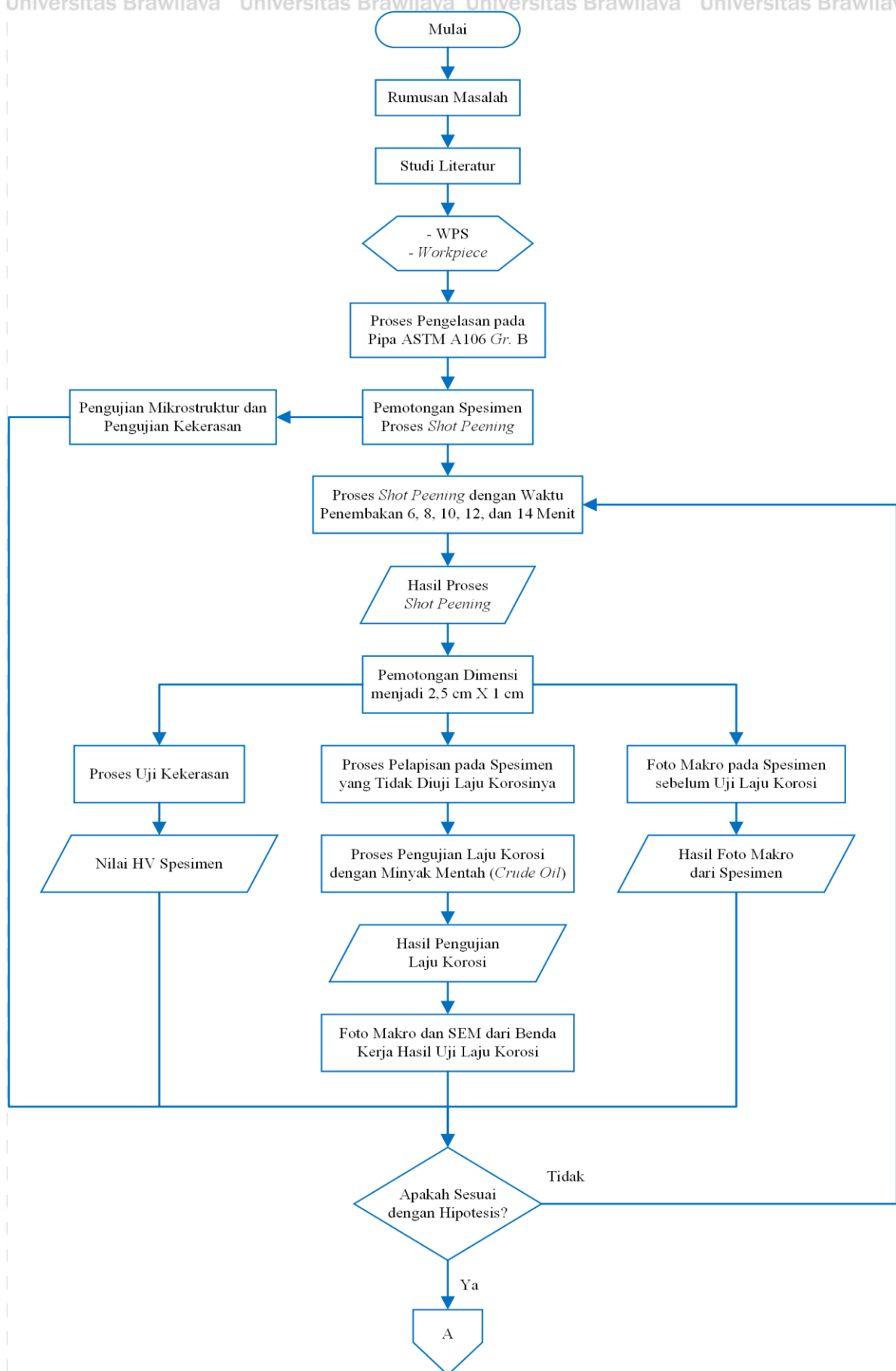
3.8 Prosedur Pengujian Spesimen

Pada spesimen yang telah dilakukan proses pengelasan dan *shot peening* selanjutnya dilakukan beberapa pengujian pada spesimen dengan langkah-langkah sebagai berikut : Untuk pengujian kekerasan, mempersiapkan spesimen yang akan diuji kekerasan, mengamplas dan bersihkan permukaan spesimen menggunakan kain lap dan autosol, menyiapkan indenter piramida intan, melakukan kalibrasi alat uji dan melakukan pengujian kekerasan pada 3 titik setiap spesimen. Untuk pengujian mikrostruktur, menyiapkan seluruh peralatan dan spesimen yang akan diuji, melakukan pembersihan pada permukaan spesimen dengan diamplas, diberikan cairan etsa pada permukaan spesimen yang akan uji, lalu kalibrasi alat uji, memasang spesimen uji pada *specimen stage* dari mikroskop digital, mengambil gambar mikrostruktur dari spesimen uji lalu simpan, melakukan pengambilan gambar mikrostruktur spesimen uji pada bagian yang dibutuhkan. Untuk Pengambilan foto makro spesimen, melakukan *setting* alat pada komputer, menentukan skala perbesaran yang digunakan dengan menggunakan millimeter blok, mengambil gambar dari setiap spesimen, melakukan pengujian laju korosi, menyiapkan seluruh peralatan dan spesimen yang akan diuji, menyiapkan larutan minyak mentah

sebagai media pengkorosi, spesimen diletakkan pada alat pengujian laju korosi, mengatur seluruh parameter yang digunakan pada pengujian laju korosi sesuai yang telah ditentukan, seluruh kabel yang tersedia pada alat pengujian korosi disambungkan dengan *personal computer*, melakukan pengukuran dan mencatat laju korosi yang terjadi pada tiap-tiap spesimen. Untuk pengambilan foto spesimen dengan menggunakan mikroskop *scanning electron microscope*, memposisikan spesimen pada *specimen stage*, melakukan pengambilan foto spesimen, dan observasi selesai.



3.9 Diagram Alir Penelitian





Gambar 3.20 Diagram alir penelitian

Pada gambar 3.20 menunjukkan diagram alir yang menjelaskan urutan proses pada penelitian ini.



BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

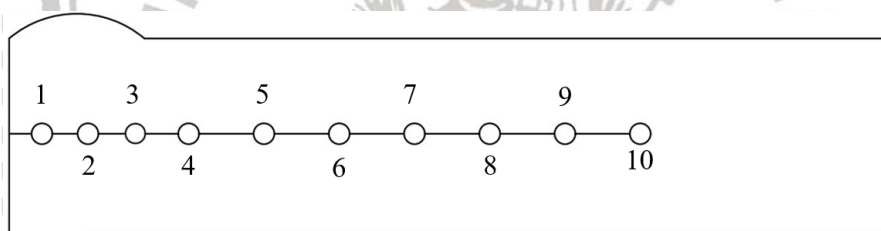
4.1 Data Hasil Pengujian

4.1.1 Data Hasil Pengujian Kekerasan Sambungan Las Pipa ASTM A106 Gr. B

Sebelum melakukan proses *shot peening*, dilakukan pengujian kekerasan pada spesimen yang telah dilas seperti yang ditunjukkan gambar 4.1 dengan tujuan untuk mengetahui daerah hasil proses pengelasan yaitu *Weld Metal*, *HAZ* (*Heat Affected Zone*), dan *Base Metal*. Pengujian kekerasan dilakukan dengan menggunakan mesin pengujian kekerasan *microvickers* dengan *force* sebesar 500 gram, selama 10 detik pada 10 titik seperti pada gambar 4.2.



Gambar 4.1 Hasil Sambungan Las



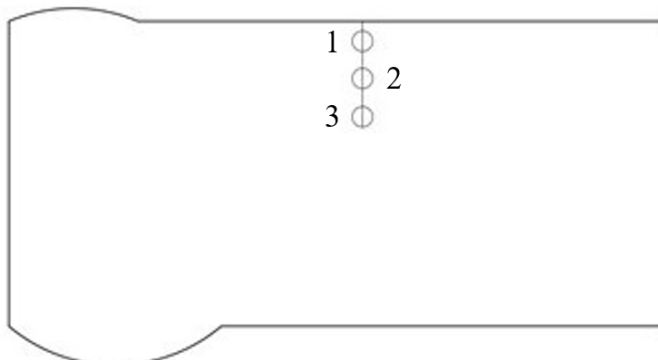
Gambar 4.2 Titik Pengujian Kekerasan Spesimen Sebelum *Shot Peening*

Tabel 4.1
Hasil Uji Kekerasan Spesimen Sebelum Proses *Shot Peening*

| Titik Ke- | Nilai Kekerasan (HV) |
|-----------|----------------------|
| 1 | 257,6 |
| 2 | 258,4 |
| 3 | 250,9 |
| 4 | 232,5 |
| 5 | 235,7 |
| 6 | 223,3 |
| 7 | 219,2 |
| 8 | 216,2 |
| 9 | 205,7 |
| 10 | 218,7 |

4.1.2 Data Hasil Pengujian Kekerasan Daerah HAZ dengan Variasi Lama Waktu Penembakan pada Sambungan Las Pipa ASTM A106 Gr. B

Setelah dilakukan proses *shot peening* dengan variasi lama waktu penembakan yaitu 6 menit, 8 menit, 10 menit, 12 menit dan 14 menit dengan tekanan konstan yaitu 8 bar dan jarak antara nosel dengan spesimen yaitu 6 cm pada daerah HAZ (*Heat Affected Zone*) sambungan las pipa ASTM A106 Gr. B, lalu dilakukan pengujian kekerasan pada 3 titik di daerah HAZ (*Heat Affected Zone*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3 dengan jarak titik pengambilan nilai kekerasan dari permukaan spesimen yang diberi proses *shot peening* secara berurutan yaitu; titik 1 0,3 mm, titik 2 0,5 mm, dan titik 3 0,7 mm, maka didapatkan hasil pengujian kekerasan pada Tabel 4.2.



Gambar 4.3 Titik Pengujian Kekerasan pada Setiap Variasi Lama Waktu Penembakan

Tabel 4.2
Hasil Pengujian Kekerasan Daerah HAZ dengan Variasi Lama Waktu Penembakan Pada Sambungan Las Pipa ASTM A106 Gr. B

| No | Lama Waktu Penembakan | Titik ke- | Nilai Kekerasan (VHN) |
|----|-----------------------|-----------|-----------------------|
| 1 | Raw Material | 1 | 212 |
| 2 | | 2 | 213,1 |
| 3 | | 3 | 205,7 |
| 4 | 6 Menit | 1 | 237,5 |
| 5 | | 2 | 217,9 |
| 6 | | 3 | 219,4 |
| 7 | 8 Menit | 1 | 253,1 |
| 8 | | 2 | 237,7 |
| 9 | | 3 | 234,3 |
| 10 | 10 Menit | 1 | 264,1 |
| 11 | | 2 | 258,1 |
| 12 | | 3 | 243 |
| 13 | 12 Menit | 1 | 271 |
| 14 | | 2 | 267 |

| | | |
|----|---|-------|
| 15 | 3 | 266 |
| 16 | 1 | 273,5 |
| 17 | 2 | 268,5 |
| 18 | 3 | 269,5 |

4.1.3 Data Hasil Pengujian Laju Korosi Sambungan Las Pipa ASTM A106 Gr. B dengan Variasi Lama Waktu Penembakan

Selain nilai kekerasan, juga didapatkan hasil pengujian nilai laju korosi sambungan las pipa ASTM A106 Gr. B dengan variasi lama waktu penembakan pada proses *shot peening* dibandingkan dengan spesimen tanpa shot peening (*raw material*) seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3

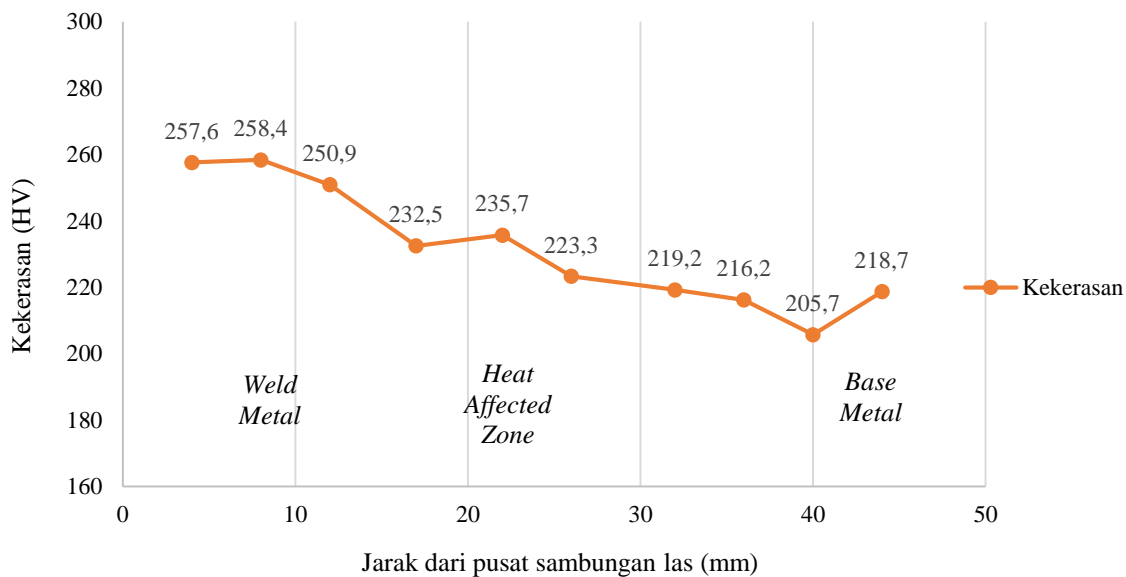
Hasil Pengujian Laju Korosi pada Sambungan Las Pipa ASTM A106 Gr. B

| No | Lama Waktu Penembakan | Corrosion Rate (mm/year) |
|----|-----------------------|-----------------------------|
| 1 | <i>Raw Material</i> | 1,027 |
| 2 | 6 Menit | 0,526 |
| 3 | 8 Menit | 0,391 |
| 4 | 10 Menit | 0,239 |
| 5 | 12 Menit | 0,092 |
| 6 | 14 Menit | 0,096 |

4.2 Hasil Pengolahan Data Pengujian Kekerasan Sambungan Las Pipa ASTM A106 Gr. B

4.2.1 Grafik Persebaran Nilai Kekerasan Daerah Las

Berdasarkan hasil pengujian yang terdapat pada Tabel 4.1, maka didapatkan grafik persebaran nilai kekerasan daerah las pada sambungan las pipa ASTM A106 Gr. B seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Grafik Persebaran Nilai Kekerasan Daerah Las

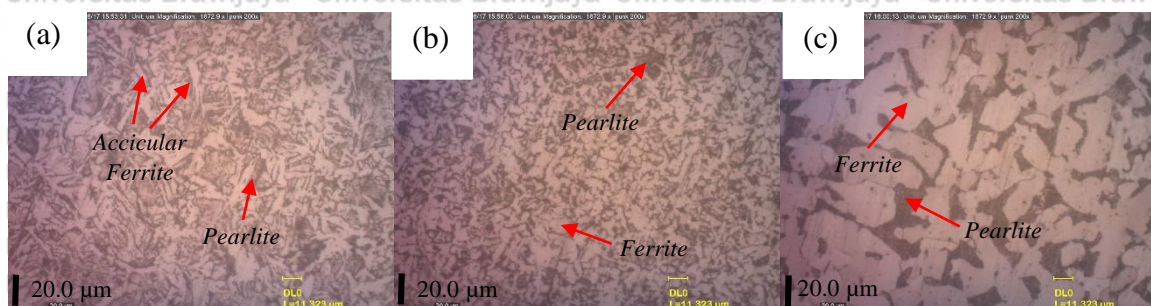
4.2.2 Analisis dan Pembahasan Grafik Persebaran Nilai Kekerasan Daerah Las

Gambar 4.4 merupakan grafik persebaran nilai kekerasan daerah las pada sambungan las pipa ASTM A106 Gr. B, dilakukan pengujian pada 10 titik dengan jarak masing-masing 4 mm. Dengan hasil yang didapatkan dari pengujian kekerasan, dapat disimpulkan bahwa daerah las yang didapatkan yaitu pada titik 1-3 merupakan *Weld Metal* karena dengan adanya proses pengelasan akan meningkatkan nilai kekerasan material atau hasil las, disebabkan oleh mikrostruktur material pada *Weld Metal* yang didominasi oleh *acicular ferrite* dengan ukuran butir yang semakin mengecil, pada titik 4-6 merupakan HAZ (*Heat Affected Zone*) karena dengan adanya fasa transformasi antara *Weld Metal* dengan *Base Metal* terbentuk perubahan dari mikrostruktur kasar akibat proses pengelasan menuju fasa yang lebih lunak (Shirinzadeh-Dastgiri *et al.* 2015) dan pada titik 7-10 merupakan *Base Metal* yang memiliki nilai kekerasan paling rendah. Proses *shot peening* akan diberikan pada daerah HAZ, mengacu pada grafik persebaran nilai kekerasan daerah las.

4.3 Data Hasil Foto Mikrostruktur Sambungan Las SMAW Pipa ASTM A106 Gr. B

4.3.1 Hasil Foto Mikrostruktur Sambungan Las SMAW Pipa ASTM A106 Gr. B

Foto mikrostruktur diambil pada spesimen tanpa perlakuan *shot peening*, didapatkan hasil dari mikrostruktur sebagai berikut :



Gambar 4.5 Foto Mikrostruktur Sambungan Las SMAW Pipa ASTM A106 Gr. B, (a) *Weld Metal*, (b) *Heat Affected Zone* dan (c) *Base Metal*

4.3.2 Analisis dan Pembahasan Hasil Foto Mikrostruktur Sambungan Las SMAW Pipa ASTM A106 Gr. B

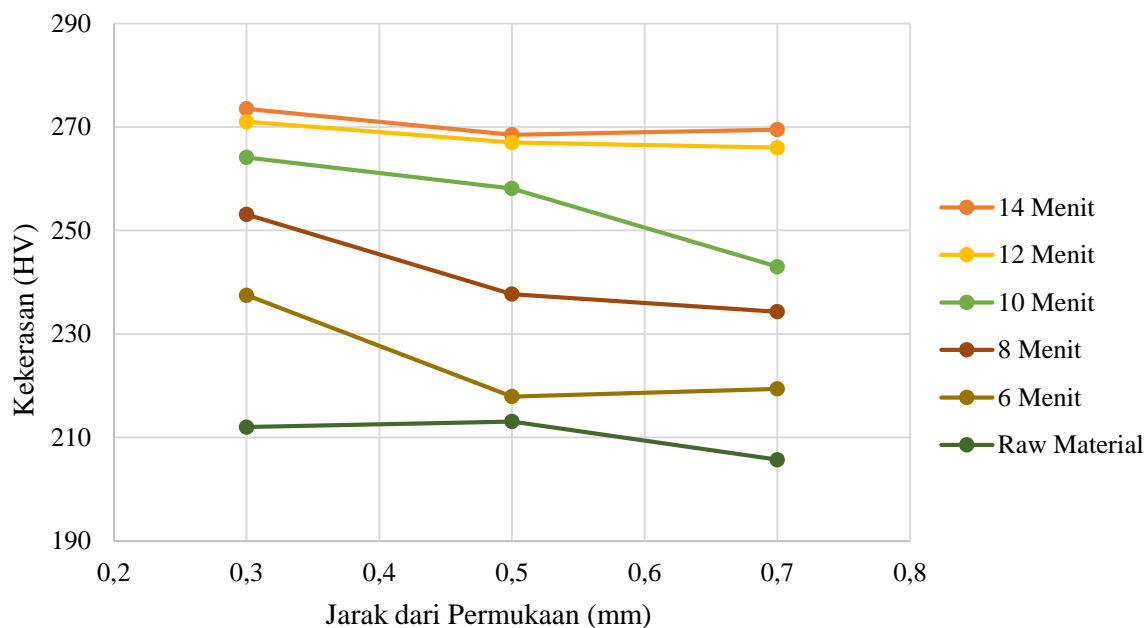
Gambar 4.5 menunjukkan penampakan mikrostruktur dari sambungan las SMAW pipa ASTM A106 Gr. B. Foto mikrostruktur diambil dengan mikroskop optik Nikon 59525 dengan perbesaran 200x dan spesimen dietsa dengan larutan 95 ml alkohol + 5 ml HNO_3 .

Pada gambar 4.4 secara berurutan dari kiri ke kanan adalah foto mikrostruktur dari *Weld Metal*, HAZ dan *Base Metal*. Dapat dilihat pada gambar 4.5 mikrostruktur dari *Weld Metal* didominasi oleh *acicular ferrite* dan *pearlite*, lalu pada HAZ terbentuk *pearlite* halus namun didominasi oleh *ferrite* dan pada *Base Metal* didominasi oleh *ferrite* karena *Base Metal* tidak banyak terpengaruh dengan panas akibat proses pengelasan. *Ferrite* memiliki warna terang dan bersifat lunak, sedangkan *pearlite* memiliki warna yang cenderung gelap dan bersifat keras. (Shirinzadeh-Dastgiri, *et al.* 2015) Maka foto mikrostruktur pada gambar 4.5 dapat dijadikan data pendukung hasil pengujian kekerasan pada daerah las, secara berurutan dari kekerasan yang tertinggi ke terendah yaitu *Weld Metal*, HAZ (*Heat Affected Zone*) dan *Base Metal*.

4.4 Hasil Pengolahan Data Pengujian Kekerasan Daerah HAZ (*Heat Affected Zone*)

4.4.1 Grafik Pengaruh Variasi Lama Waktu Penembakan terhadap Kekerasan Daerah HAZ (*Heat Affected Zone*)

Berdasarkan hasil pengujian yang terdapat pada Tabel 4.2, maka didapatkan grafik pengaruh variasi lama waktu penembakan terhadap kekerasan daerah HAZ sambungan las pipa ASTM A106 Gr. B seperti dibawah ini:



Gambar 4.6 Grafik Pengaruh Lama Waktu Penembakan Terhadap Kekerasan Daerah HAZ

4.4.2 Analisis dan Pembahasan Grafik Pengaruh Lama Waktu Penembakan Terhadap Kekerasan Daerah HAZ (*Heat Affected Zone*)

Gambar 4.6 merupakan grafik pengaruh lama waktu penembakan terhadap kekerasan daerah HAZ pada sambungan las pipa ASTM A106 Gr. B, dapat dilihat bahwa secara keseluruhan dari grafik dapat dilihat bahwa dengan diberikannya proses *shot peening* maka nilai kekerasan dari spesimen akan meningkat. Nilai kekerasan yang terbesar diperoleh pada spesimen dengan lama waktu penembakan selama 14 menit dengan jarak 0,3 mm dari permukaan yang mengalami proses *shot peening* sebesar 273,5 HV dan secara berurutan nilai kekerasan yang didapat diikuti oleh spesimen dengan variasi waktu penembakan 12 menit, 10 menit, 8 menit, dan 6 menit dibandingkan dengan *raw material* yang memiliki nilai kekerasan tertinggi sebesar 213,1 HV pada dengan jarak 0,5 mm dari permukaannya. Nilai kekerasan yang didapatkan pada setiap variasi yang tertinggi terdapat pada jarak yang

paling dekat dengan permukaan spesimen secara berurutan yaitu 0,3 mm diikuti dengan jarak 0,5 dan 0,7 mm dari permukaan, yang berarti bahwa proses *shot peening* dapat meningkatkan kekerasan permukaan spesimen dengan menghasilkan *compressive residual stress* (Sasikumar *et al.* 2020).

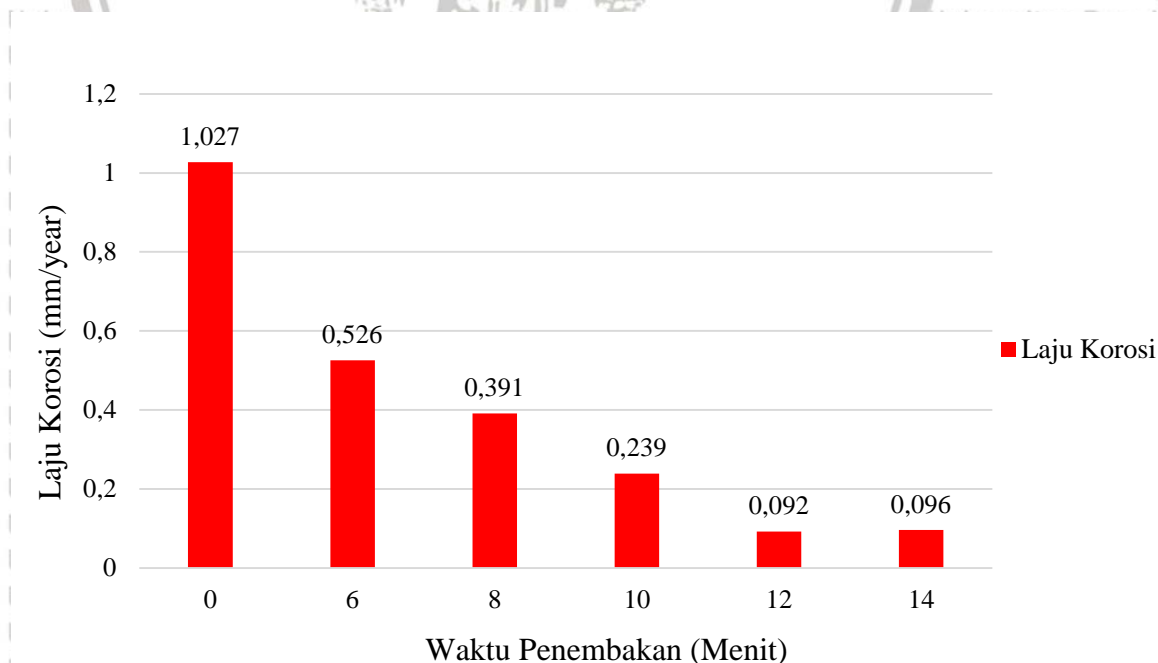
Dilihat dari grafik, nilai kekerasan semakin meningkat seiring dengan semakin lamanya waktu penembakan yang diberikan kepada spesimen, hal tersebut dikarenakan meningkatnya densitas dari dislokasi yang terjadi pada batas butir akibat dari benturan bola-bola baja pada permukaan material yang dapat mencegah atau mengurangi adanya pergerakan dislokasi sehingga kekerasan dapat meningkat seiring dengan semakin lamanya waktu penembakan. (Azar *et al.* 2010)

4.5 Hasil Pengolahan Data Pengujian Laju Korosi Sambungan Las SMAW Pipa

ASTM A106 Gr. B

4.5.1 Grafik Pengaruh Variasi Lama Waktu Penembakan Terhadap Laju Korosi Sambungan Las SMAW Pipa ASTM A106 Gr. B

Berdasarkan hasil pengujian yang terdapat pada Tabel 4.2, maka didapatkan grafik pengaruh variasi lama waktu penembakan terhadap laju korosi sambungan las pipa ASTM A106 Gr. B seperti dibawah ini:



Gambar 4.7 Grafik pengaruh variasi lama waktu penembakan terhadap laju korosi spesimen pipa ASTM A106 Gr. B

4.5.2 Analisis dan Pembahasan Grafik Pengaruh Lama Waktu Penembakan Terhadap Laju Korosi Sambungan Las SMAW Pipa ASTM A106 Gr. B

Pada Gambar 4.7 menunjukkan grafik pengaruh variasi lama waktu penembakan terhadap laju korosi sambungan las pipa ASTM A106 Gr. B. Laju korosi paling tinggi pada grafik ini didapatkan pada spesimen tanpa perlakuan *shot peening* sebesar 1,027 mm/year.

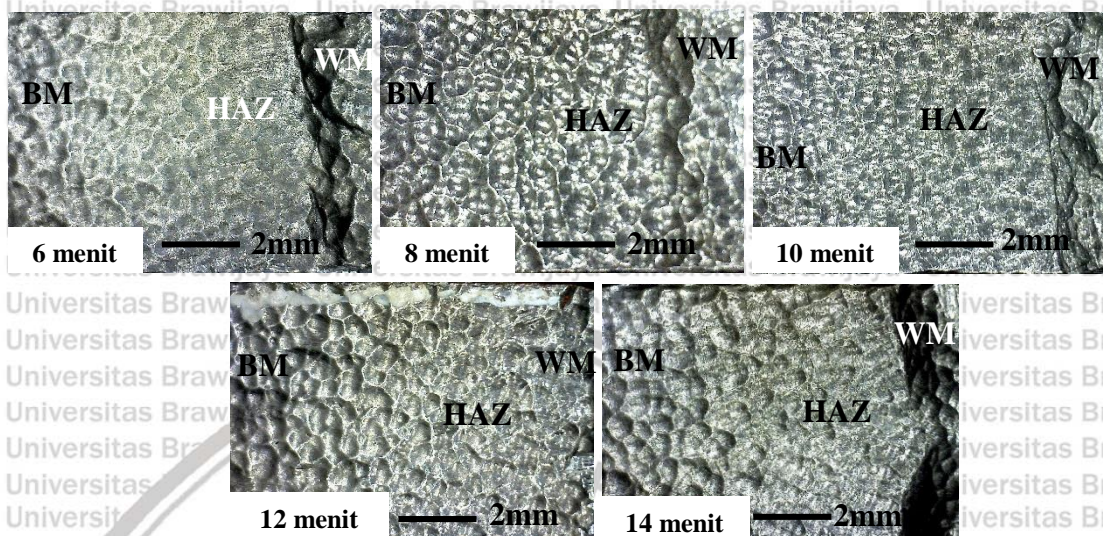
Adapun dengan diberikannya proses *shot peening* terhadap spesimen didapatkan nilai laju korosi yang lebih rendah daripada spesimen tanpa proses *shot peening*. Dengan lama waktu penembakan 6 menit nilai laju korosinya 0,526 mm/year, dilanjutkan lama waktu penembakan 8 menit nilai laju korosinya 0,391 mm/year, lalu dengan lama waktu penembakan 10 menit nilai laju korosinya 0,239 mm/year. Selanjutnya dengan lama waktu penembakan 12 menit nilai laju korosinya 0,092 mm/year dan yang terakhir dengan lama waktu penembakan 14 menit nilai laju korosinya 0,096 mm/year.

Dari grafik dapat dilihat bahwa dengan diberikannya proses *shot peening* terhadap spesimen dapat mengurangi ataupun menghambat laju korosi dari spesimen, karena proses *shot peening* dapat memberikan benturan yang menimbulkan adanya deformasi plastis oleh bola-bola baja yang ditembakkan pada permukaan dari spesimen. Semakin lama waktu penembakan pada proses *shot peening* maka semakin rendah nilai laju korosinya, karena terjadi peningkatan kerapatan butir dari permukaan spesimen yang terkena proses *shot peening* sehingga menjadi lapisan pelindung untuk lapisan yang di dalamnya lebih tahan terhadap korosi. (Priyambodo, 2019). Nilai laju korosi yang paling optimal didapatkan dengan lama waktu penembakan 12 menit, apabila lama waktu penembakan lebih dari 12 menit maka nilai laju korosi akan semakin meningkat karena dapat terjadi *over peening* yang menyebabkan kerusakan material yang berlebihan pada proses *shot peening*.

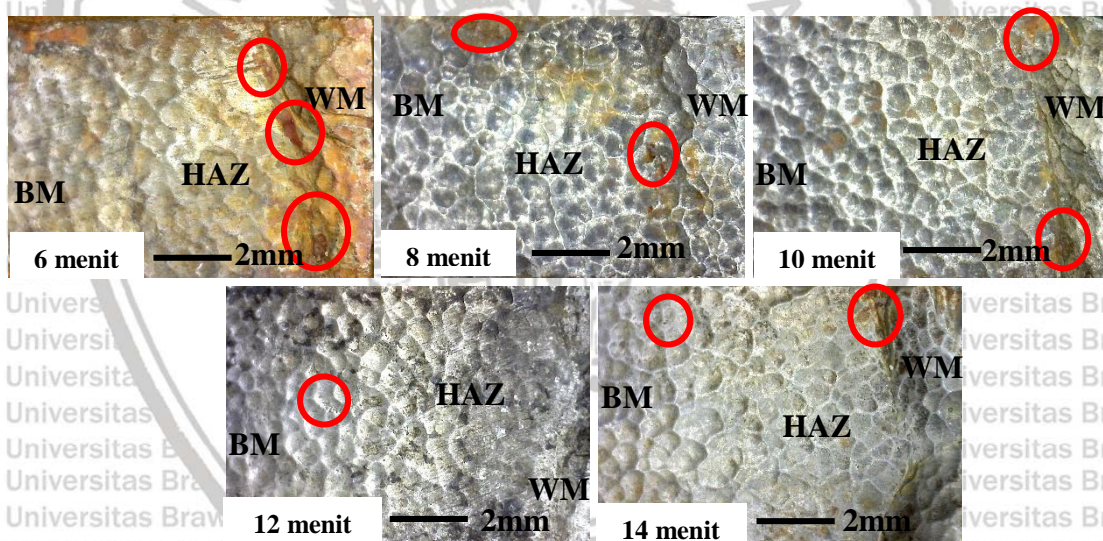
4.6 Data Hasil Foto Makro pada Spesimen

4.6.1 Gambar Hasil Foto Makro Spesimen

Foto makro diambil dengan mikroskop digital dengan perbesaran 25x didapatkan hasil sebagai berikut:



Gambar 4.8 Foto makro spesimen sebelum dilakukan pengujian laju korosi



Gambar 4.9 Foto makro spesimen setelah dilakukan pengujian laju korosi

4.6.2 Analisis Gambar Hasil Foto Makro Spesimen Sebelum dan Sesudah Pengujian

Laju Korosi

Pada Gambar 4.8 menunjukkan hasil foto makro dengan perbesaran 25x yang dilakukan menggunakan mikroskop digital pada spesimen dengan variasi lama waktu penembakan pada proses *shot peening* sebelum dilakukan pengujian laju korosi. Dari gambar tersebut, lama waktu penembakan yang digunakan secara berurutan dari sebelah kiri ke sebelah kanan, yaitu: 6 menit; 8 menit; 10 menit; 12 menit; dan 14 menit. Terlihat

bahwa semakin lama waktu penembakan yang digunakan pada proses *shot peening* membentuk *dimple* akibat benturan dari bola-bola baja yang ditembakkan pada spesimen akan semakin merata karena intensitas dari *shot peening* akan meningkat seiring dengan semakin lamanya waktu penembakan dan membuat adanya perbaikan mikrostruktur pada permukaan spesimen.

Sedangkan pada Gambar 4.9 menunjukkan hasil foto makro dengan perbesaran 25x yang dilakukan menggunakan mikroskop digital pada spesimen dengan variasi lama waktu penembakan pada proses *shot peening* setelah dilakukan pengujian laju korosi. Dari gambar tersebut, dapat dilihat bahwa banyak perbedaan dibandingkan dengan spesimen sebelum dilakukan pengujian laju korosi. Setelah dilakukan pengujian laju korosi, pada permukaan spesimen terlihat banyak terdapat kerusakan material pada daerah yang ditandai dengan lingkaran merah diakibatkan terjadinya fenomena korosi setelah dilakukan pengujian laju korosi dengan larutan elektrolitnya minyak mentah (*crude oil*). Dari semua variasi lama waktu penembakan yang digunakan, spesimen dengan lama waktu penembakan 6 menit mengalami korosi paling besar.

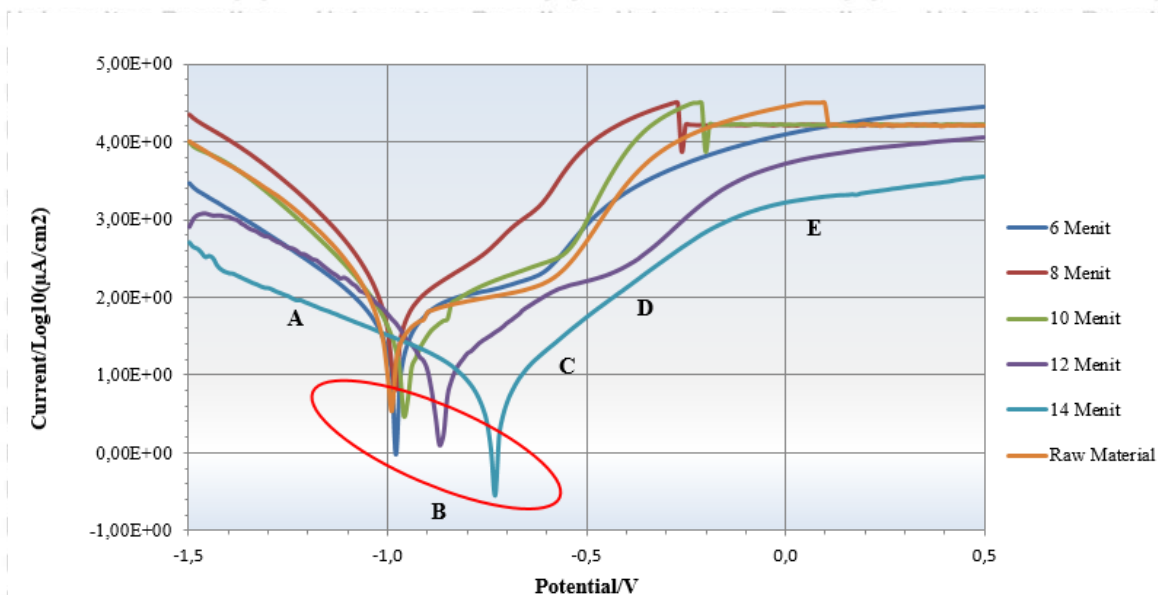
4.7 Data Hasil Pengolahan Grafik Polarisasi dari Pengujian Laju Korosi Spesimen

4.7.1 Data Hasil Pengolahan Grafik Polarisasi Laju Korosi setiap Perlakuan Spesimen dengan Variasi Lama Waktu Penembakan

Dari hasil pengujian laju korosi menggunakan tiga buah elektroda, yaitu: *counter electrode*; *reference electrode* serta *working electrode* pada setiap spesimen dengan variasi lama waktu penembakan pada proses *shot peening*, maka didapatkan hasil data berupa Tabel 4.4 dan grafik polarisasi seperti berikut:

Tabel 4.4
Nilai Karakteristik dari Hasil Pengujian Laju Korosi Sambungan Las Pipa ASTM A106 Gr. B

| No | β_{anodic} (V/ decade) | $\beta_{cathodic}$ (V/ decade) | E_{corr} (V) | I_{corr} (μA) | $I_{corr} / surface\ area$ (A/ cm^2) | Corrosion Rate (mm/year) |
|----|---------------------------------|-----------------------------------|-------------------|---------------------------|--|-----------------------------|
| 1 | 0,564 | 0,320 | -0,958 | 203,60 | $8,703 \times 10^{-5}$ | 1,027 |
| 2 | 0,762 | 0,428 | -0,980 | 99,90 | $4,460 \times 10^{-5}$ | 0,526 |
| 3 | 0,258 | 0,164 | -0,980 | 85,88 | $3,316 \times 10^{-5}$ | 0,391 |
| 4 | 1,053 | 0,180 | -0,960 | 49,99 | $2,024 \times 10^{-5}$ | 0,239 |
| 5 | 0,392 | 0,232 | -0,870 | 18,82 | $7,778 \times 10^{-5}$ | 0,092 |
| 6 | 0,478 | 0,897 | -0,730 | 18,27 | $8,157 \times 10^{-5}$ | 0,096 |



Gambar 4.10 Grafik polarisasi laju korosi spesimen dengan variasi lama waktu penembakan

4.7.2 Analisis Grafik Polarisasi Laju Korosi dengan Variasi Lama Waktu Penembakan pada Pipa ASTM A106 Gr. B

Gambar 4.10 menunjukkan grafik polarisasi laju korosi spesimen dengan variasi lama waktu penembakan pada proses *shot peening* dibandingkan dengan spesimen tanpa proses *shot peening* (*raw material*). Grafik polarisasi korosi merupakan grafik yang menunjukkan hubungan kerapatan arus dan fungsi potensial selama proses korosi. Dapat dilihat pada gambar, bahwa grafik polarisasi korosi terbagi menjadi beberapa daerah. Daerah A – B merupakan daerah terjadinya potensial katodik, dimana potensial yang diberikan tidak berpengaruh pada material yang diuji. Pada titik B merupakan titik E_{corr} , menunjukkan potensial korosi pada material. Daerah B – C menunjukkan material sebelum mencapai potensial yang dibutuhkan untuk terjadinya lapisan pasifisasi. Pada titik C menunjukkan dimana material uji mencapai tahap lapisan pasif. Daerah C – D merupakan daerah yang menunjukkan material pada tahap pembentukan lapisan pasif yang menjadikan nilai korosi cenderung menjadi konstan, lapisan pasif yang terbentuk berfungsi untuk mencegah terjadinya korosi yang berkelanjutan pada material. Pada titik D menunjukkan lapisan pasif pada material telah rusak dan material mulai mengalami korosi secara bebas, sehingga mulailah muncul *pitting*. Daerah D – E merupakan daerah yang transparansi sehingga material telah terkorosi secara bebas dan kerapatan arus mulai naik seiring dengan banyaknya jumlah korosi yang terjadi. Dapat dilihat dari Tabel 4.4 semakin lama waktu penembakan pada proses *shot peening*, semakin rendah nilai I_{corr} nya. Maka, dengan semakin lama waktu penembakan proses *shot peening* pada sambungan las pipa ASTM

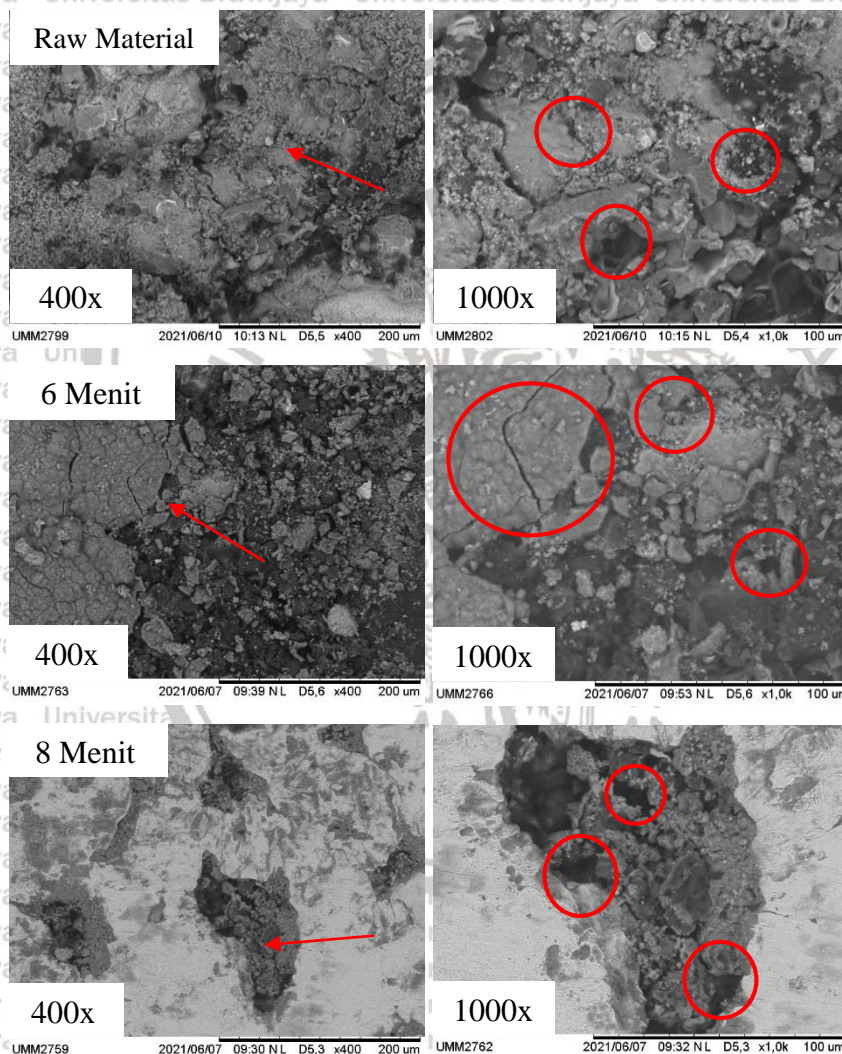
A106 Gr. B akan memperbaiki struktur butir dan memberikan tegangan sisa tekan pada permukaan spesimen sehingga dapat meningkatkan ketahanan material terhadap korosi.

4.8 Data Hasil Foto *Scanning Electron Microscope*

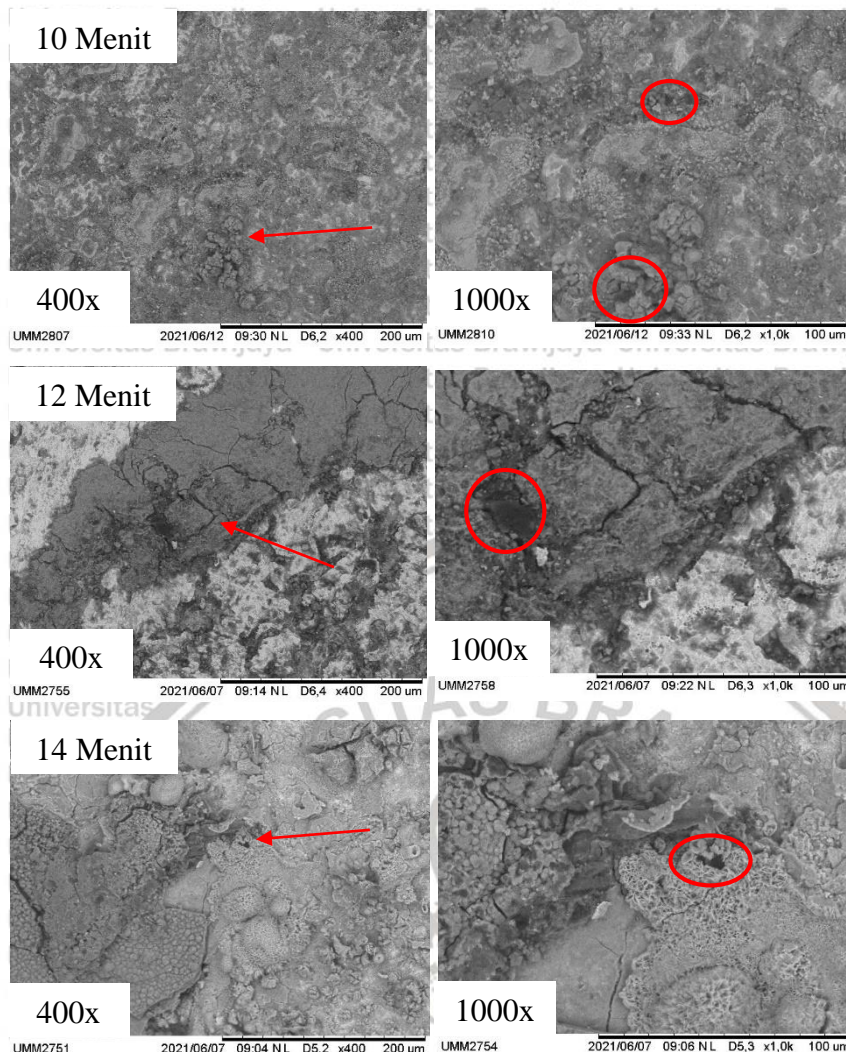
4.8.1 Hasil Foto *Scanning Electron Microscope* Spesimen dengan Variasi Lama

Waktu Penembakan pada Proses *Shot Peening*

Dari foto *Scanning Electron Microscope* perbesaran 400x dan 1000x spesimen dengan variasi lama waktu penembakan pada proses *shot peening* dan *raw material* (pasca pengujian laju korosi), didapatkan gambar sebagai berikut :



Gambar 4.11 Hasil foto *Scanning Electron Microscope* perbesaran 400x dan 1000x spesimen *raw material* dan spesimen dengan variasi lama waktu penembakan 6 menit dan 8 menit (pasca pengujian laju korosi)



Gambar 4.12 Hasil foto *Scanning Electron Microscope* perbesaran 400x dan 1000x spesimen dengan variasi lama waktu penembakan 10 menit, 12 menit dan 14 menit (pasca pengujian laju korosi)

4.8.2 Analisis Hasil Foto *Scanning Electron Microscope* Spesimen dengan Variasi Lama Waktu Penembakan pada Proses *Shot Peening*

Gambar 4.11 menunjukkan hasil foto SEM (*Scanning Electron Microscope*) dengan perbesaran 400x dan 1000x pada spesimen dengan variasi lama waktu penembakan pada proses *shot peening* yaitu 6 menit, 8 menit, 10 menit, 12 menit, 14 menit dan *raw material* (pasca pengujian korosi).

Pada gambar 4.11 dan gambar 4.12 dapat dilihat bahwa terdapat penampakan dari korosi pada masing-masing spesimen setelah dilakukan pengujian laju korosi, pada gambar yang sebelah kiri merupakan foto SEM dengan perbesaran 400x dan yang sebelah kanan merupakan foto SEM dengan perbesaran 1000x. Fenomena korosi yang terdapat pada gambar hasil SEM ditandai dengan lingkaran merah terdapat adanya inisiasi korosi lubang yang terdapat pada permukaan spesimen. Dari hasil foto SEM dapat dilihat bahwa *raw*

material tanpa perlakuan proses *shot peening* mengalami korosi yang paling parah dibandingkan dengan spesimen yang diberikan perlakuan proses *shot peening*, namun pada spesimen dengan perlakuan proses *shot peening* juga terlihat bahwa terdapat inisiasi korosi *pitting* pada permukaannya. *Pitting corrosion* merupakan bentuk korosi lokal pada permukaan logam di area yang cenderung kecil dan dapat menimbulkan korosi yang mengarah pada pembentukan rongga atau lubang. Logam yang membentuk lapisan pasif seperti baja, lebih rentan terhadap bentuk korosi ini. *Pitting corrosion* adalah bentuk korosi yang paling berbahaya karena dapat menyebabkan kegagalan dengan *weight-loss* sebagian kecil dari suatu material dan menjadi penyebab kegagalan utama dalam industri pengolahan kimia karena sifatnya yang destruktif. (Zaki, 2006)



BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Variasi lama waktu penembakan pada proses penembakan *shot peening* berpengaruh terhadap hasil kekerasan pada sambungan las SMAW pipa ASTM A106 Gr. B. Nilai kekerasan semakin meningkat seiring dengan semakin lamanya waktu penembakan yang diberikan kepada spesimen, hal tersebut dikarenakan meningkatnya densitas dari dislokasi yang terjadi pada batas butir akibat dari benturan bola-bola baja pada permukaan material yang dapat mencegah atau mengurangi adanya pergerakan dislokasi sehingga kekerasan dapat meningkat seiring dengan semakin lamanya waktu penembakan. Nilai kekerasan yang terbesar diperoleh pada spesimen dengan lama waktu penembakan selama 14 menit dengan jarak 0,3 mm dari permukaan yang mengalami proses *shot peening* sebesar 273,5 HV, yang berarti bahwa proses *shot peening* dapat meningkatkan kekerasan permukaan spesimen dengan menghasilkan *compressive residual stress*.
2. Variasi lama waktu penembakan pada proses penembakan *shot peening* berpengaruh terhadap hasil nilai laju korosi pada sambungan las SMAW pipa ASTM A106. Dengan diberikannya proses *shot peening* terhadap spesimen dapat mengurangi ataupun menghambat laju korosi dari spesimen, karena proses *shot peening* dapat memberikan benturan yang menimbulkan adanya deformasi plastis oleh bola-bola baja yang ditembakkan pada permukaan dari spesimen. Semakin lama waktu penembakan pada proses *shot peening* maka semakin rendah nilai laju korosinya, karena terjadi peningkatan kerapatan butir dari permukaan spesimen yang terkena proses *shot peening* sehingga menjadi lapisan pelindung untuk lapisan yang di dalamnya lebih tahan terhadap korosi. Dengan memvariasikan lama waktu penembakan, nilai laju korosi yang paling efektif didapatkan dengan lama waktu penembakan 12 menit, apabila lama waktu penembakan lebih dari 12 menit maka nilai laju korosi akan semakin meningkat karena dapat terjadi *over peening* yang menyebabkan kerusakan material yang berlebihan pada proses *shot peening*.

5.2 Saran

1. Untuk penelitian selanjutnya, diharapkan dapat mengembangkan instalasi dari proses *shot peening* agar dapat mendapatkan hasil data yang lebih maksimal.
2. Dalam proses *shot peening* terdapat banyak parameter yang dapat divariasikan, diharapkan pada penelitian selanjutnya dapat mencari parameter yang tepat.
3. Terdapat banyak proses yang dapat digunakan dalam menghilangkan tegangan sisa akibat proses pengelasan, untuk penelitian selanjutnya dapat meninjau proses yang paling efektif dan optimal untuk menghilangkan tegangan sisa akibat pengelasan.



DAFTAR PUSTAKA

- Alamri A.H. 2020. *Localized corrosion and mitigation approach of steel materials used in oil and gas pipelines – An overview*. Saudi Arabia : Imam Abdulrahman Bin Faisal University
- Antaki G.A. 2003. *Piping and Pipeline Engineering : Design, Construction, Maintenance, Integrity, and Repair*. U.S.A. : Marcel Dekker, Inc.
- Anto R., Deshmukh S., Sanyal S., K. Bhui U.K. 2020. *Nanoparticles as flow improver of petroleum crudes: Study on temperature dependent steady-state and dynamic rheological behavior of crude oils*. India : Pandit Deendayal Petroleum University
- Azar V., Hashemi B., Yazdi M.R. 2010. *The effect of shot peening on fatigue and corrosion behavior of 316L stainless steel in Ringer's solution*. Iran : Shiraz University
- Bhuvaraghan B., Srinivasan S.M., Maffeo B. 2010. *Optimization of the fatigue strength of materials due to shot peening : A Survey*. International Journal of Structural Changes in Solids : Mechanics and Applications Volume 2, Number 2, November 2010, pp. 33-63.
- Callister, William D. 2007. *Materials science and engineering : an introduction*, 7th edition. United States of America : John Wiley & Sons, Inc.
- Callister, William D. 2014. *Materials Science and Engineering : An Introduction*, 9th edition. Utah, United States of America: The University of Utah. Wiley Blinder
- Chen C., Li C., Reniers G., Yang F. 2020. *Safety and security of oil and gas pipeline transportation: A systematic analysis of research trends and future needs using WoS*. China : Southwest Petroleum University.
- Cho T.K. et al. 2012. *Surface hardening of aluminum alloy by shot peening treatment with Zn based ball*. Republic of Korea : Korea Institute of Industrial Technology
- Fontana, Mars G. 1987. *Corrosion Engineering, Third Edition*. Singapore: McGraw-Hill.
- Gong K. et al. 2020. *Effect of dissolved oxygen concentration on stress corrosion cracking behavior of pre-corroded X100 steel base metal and the welded joint in wet-dry cycle conditions*. China : Liaoning Shihua University
- Groover, Mikell P. 2010. *Fundamental of Modern Manufacturing, Material, Processes and System, Fourth Edition*. United State of America: John Wiley & Sons, Inc.
- Hidayat, H. (2015). Makalah Korosi. Jurusan Pendidikan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Yogyakarta.
- Ibrahim, R.I, Odah M.K, Al-Mutfi A. 2019. *An Overview on the Recent Techniques for Improving the Flowability of Crude Oil in Pipelines*. Iraq : 1st International Conference on Petroleum Technology and Petrochemicals

Jeffus, L. 2012. *Welding and Metal Fabrication*. United State of America : Delmar, Cengage Learning.

Kalpakjian, Serope & Schmid, Steven R. 2009. *Manufacturing Engineering and Technology*. 6th Edition in SI Units. New York: Prentice Hall.

Kessal B.A. *et al.* 2020. *Effect of gas tungsten arc welding parameters on the corrosion resistance and the residual stress of heat affected zone*. Algeria : Hassiba Benbouali University of Chlef

Kumar H., Singh S., Kumar P. 2013. *Modified Shot Peening Processes – A Review*. India : International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies.

Laboratorium Biologi Fakultas MIPA Universitas Muhammadiyah Malang.

Laboratorium Pengecoran Logam Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

Laboratorium Teknik Mesin Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Merdeka Malang.

Laboratorium Teknik Mesin Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Malang.

Mahajan S., Sharma S., Goyal D., Chhibber R. 2020. *Effect of shot peening on the high temperature molten salt corrosion resistance of P91 boiler steel*. India : Indian Institute of Technology Jodhpur.

Mannens R., Trauth D., Mattfeld P., Klocke F. 2018. *Influence of Impact Force, Impact Angle, and Stroke Length in Machine Hammer Peening on the Surface Integrity of the Stainless Steel X3CrNiMo13-4*. German : RWTH Aachen University.

MIC. 2005. *Shot Peening Applications*. USA. Curtiss-Wright Corporation.

Moniz, B.J. 2004. *Welding Skills*. Illinois, United States of America. American Technical Publisher, Inc.

Nasilowska B., Bogdanowicz Z., Wojucki M. 2015. *Shot peening effect on 904 L welds corrosion resistance*. Polandia : Institute of Precision Mechanics

Phillips, D.H. 2016. *Welding Engineering an Introduction*, First Edition. United Kingdom. John Wiley & Sons, Ltd.

Priyambodo, Bambang Hari., Suhartoyo., Slamet, Sugeng. 2019. *Studi Pengaruh Shot Peening Pada Permukaan Cu35Zn Terhadap Ketahanan Korosi*. Indonesia : Akademi Teknologi Warga Surakarta.

Sari, N.H. (2018). *Material Teknik*. Sleman: Deepublish. https://books.google.co.id/books?hl=en&lr=&id=AoxLDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR6&dq=info:R5T6GFtTC2sJ:scholar.google.com&ots=iKmD13ne0S&sig=z2-nXXygHD_8Lc748YHlIhXGtrE&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false (diakses pada 20 Januari 2020)

Sasikumar K.S.K. *et al.* 2020. *Effect of shot peening on surface properties of Al7075 hybrid aluminum metal matrix composites*. India : Kongu Engineering College.

Sharma, L. 2020. *Advent of different grades of HSLA pipeline steels and their structural integrity issues related to welding – ‘A review’*. India : Chandigarh University.

Shirinzadeh-Dastgiri *et al.* 2015. *Metallurgical investigations and corrosion behavior of failed weld joint in AISI 1518 low carbon steel pipeline*. Iran : Islamic Azad University.

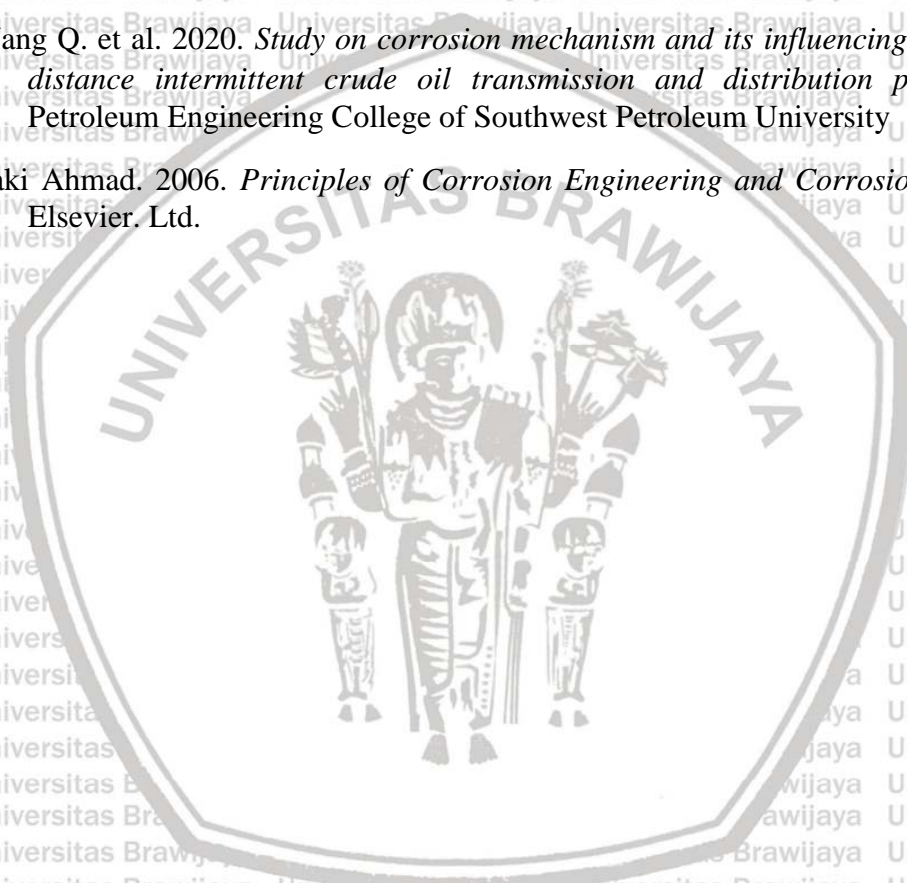
Souas F., Safri A., Benmounah A. 2020. *A review on the rheology of heavy crude oil for pipeline transportation*. Algeria : University of Science and Technology Houari Boumediene.

Syukran, Azwinur, Ferdiyansyah. 2020. *The Effect Of Holding Time On Stress Relief Annealing Process To Hardness Of Carbon Steel Sa.106 Grade B After Welding*. Indonesia : Lhokseumawe State Polytechnic.

Utomo, B. (2009). *Jenis Korosi Dan Penanggulangannya*. Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro. KAPAL, Vol. 6, No.2.

Wang Q. *et al.* 2020. *Study on corrosion mechanism and its influencing factors of a short distance intermittent crude oil transmission and distribution pipeline*. China : Petroleum Engineering College of Southwest Petroleum University

Zaki Ahmad. 2006. *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*. USA : Elsevier. Ltd.





产品质量证明书
QUALITY CERTIFICATE

中建材国贸
CNBM International

[illegible]

Lampiran 2 Sertifikat Welder



Lampiran 3 Welding Procedure Specification (WPS)

Office : Jl. Sate VI No. 18 Brinjan Sember, Surabaya - 60217
Telp : 031-7400333, Fax: 031-7341620
Website : www.kampuh-indonesia.com

WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS) QUALIFIED BY TESTING

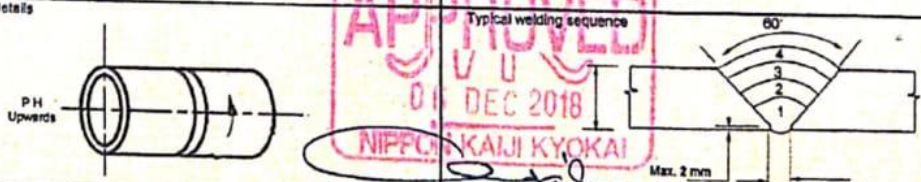
| | | |
|--|--|--|
| Company Name : WELDING INDONESIA | | Revision No. : 01 |
| WPS No. : WPS/020-A | | Date : October 23, 2018 |
| Welding Process(es) : 335 | | Type : Manual <input type="checkbox"/> Semi-Automatic <input checked="" type="checkbox"/> Automatic <input type="checkbox"/> |
| Supporting PQR No. (s) : 009 | | Machine : <input type="checkbox"/> |
| Applicable Code : ASME I / D1.1M : 2015 | | |

| | |
|--|---|
| JOINT DESIGN USE: Type : BUTT JOINT Single <input checked="" type="checkbox"/> Double Weld <input type="checkbox"/> Backing : Yes <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/> Backing Material : Min. 2 - 3 mm Root Opening : Max. 0 - 2 mm Root Face Dimension : 60° Groove Angle : 60° Radius (J-U) : - Back Gouging : Yes <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/> Other : - | POSITION Position of Groove : PH Fillet : - Vertical Progression : Up <input checked="" type="checkbox"/> Down <input type="checkbox"/> |
|--|---|

| | |
|--|---|
| BASE METALS Material Spec. : API 5L / ASTM A 105 / A 53 Thickness : GRADE B PSL-1 Groove : 10.97 (SCH 80 PIPE) Fillet : - Diameter (Pipe) : 168.3 | ELECTRICAL CHARACTERISTICS Transfer Mode (GMAW) : <input type="checkbox"/> Short-Circuiting <input type="checkbox"/> Spray Pulsed <input type="checkbox"/> Curret : AC <input type="checkbox"/> DCEP <input checked="" type="checkbox"/> DCEN <input type="checkbox"/> Other : ROOT PASS DCEN FILLER - HOT PASS DCEP Tungsten Electrode (GTAW) : N/A Size : - Type : - |
|--|---|

| | |
|---|--|
| FILLER METALS AWS Specification : A 51 AWS Classification : E 7016 | TECHNIQUE Stringer or Weave Bead : BOTH Multi-pass or Single Pass (per side) : N/A Multipass Number of Electrodes : N/A Electrode Spacing : N/A Longitudinal : N/A Lateral : N/A Angle : N/A Contact Tube to Work Distance : N/A Peening : None Interpass Cleaning : Brushing and Grinding |
|---|--|

| | |
|---|--|
| SHIELDING Flux : N/A Electro-Flux (class) : N/A Gas : N/A Composition : N/A Flow Rate : N/A Gas Cup Size : N/A | POSTWELD HEAT TREATMENT Temp. : None Time : - |
|---|--|

| | |
|--|--|
| PREHEAT Preheat Temp., Min. : N/A Interpass Temp., Min. : N/A Max. Preheat Method : N/A Control Method : - | Joint Details  |
|--|--|

| WELDING DETAIL | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|---------|---------------|-----------|-----------------|----------|-----------|-----------------------|--------------------|---------------|-----------------|--------|
| Pass or Weld Layer(s) | Process | Filler Metals | | Current | | Volts (V) | Travel Speed (mm/min) | Heat Input (KJ/cm) | Shielding Gas | | Remark |
| | | Class | Dia. (mm) | Type & Polarity | Amps (A) | | | | Type | Flow Rate (LPM) | |
| 1 | SMAW | E 7016 | 2.6 | DC- | 30 - 80 | 20 - 20 | 30 - 70 | - | - | - | |
| 2 | SMAW | E 7016 | 2.6 | DC+ | 50 - 80 | 19 - 25 | 20 - 70 | - | - | - | |
| 3 | SMAW | E 7016 | 2.6 | DC+ | 50 - 80 | 19 - 25 | 30 - 60 | - | - | - | |
| 4 | SMAW | E 7016 | 3.2 | DC+ | 80 - 110 | 19 - 25 | 40 - 70 | - | - | - | |

Prepared by :
WELDING INSPECTOR

TRI REJEKI, ST.

Checked by :
WELDING ENGINEER

KAMPUH WELDING INDONESIA
Dr. Ir. M. ZAED YULADI, MSc.

Witness by :
CLASSNK

Surveyor
Surabaya

Lampiran 4 Data Sheet Hasil Pengujian Kekerasan

HASIL UJI KEKERASAN MICROVICKERS ACHIRUL JAMHAR (NIM 175060201111001) UNIVERSITAS BRAWIJAYA MALANG

| No | Kode Spesimen | Titik Uji | Kekerasan (HV) |
|----|----------------|-----------|----------------|
| 1 | 6 MENIT | 1 | 237.5 |
| 2 | | 2 | 217.9 |
| 3 | | 3 | 219.4 |
| 4 | 8 MENIT | 1 | 253.1 |
| 5 | | 2 | 237.7 |
| 6 | | 3 | 234.3 |
| 7 | 10 MENIT | 1 | 264.1 |
| 8 | | 2 | 258.1 |
| 9 | | 3 | 243.0 |
| 10 | 12 MENIT | 1 | 271.0 |
| 11 | | 2 | 267.0 |
| 12 | | 3 | 266.0 |
| 13 | 14 MENIT | 1 | 273.5 |
| 14 | | 2 | 268.5 |
| 15 | | 3 | 269.5 |
| 16 | ROW MATERIAL | 1 | 212.0 |
| 17 | | 2 | 213.1 |
| 18 | | 3 | 205.7 |
| 19 | ROW MATERIAL I | 1 | 257.6 |
| 20 | | 2 | 258.4 |
| 21 | | 3 | 250.9 |
| 22 | | 4 | 232.5 |
| 23 | | 5 | 235.7 |
| 24 | | 6 | 223.3 |
| 25 | | 7 | 219.2 |
| 26 | | 8 | 216.2 |
| 27 | | 9 | 205.7 |
| 28 | | 10 | 218.7 |

force : 500 gram
dwell : 10 detik

Malang, 31 Mei 2021
Kepala Lab. Teknik Mesin UM



Drs. IMAM SUDJONO, MT
NIP. 19600327 198601 1002

Lampiran 5 Hasil Analisis Kandungan Sulfur dan pH *Crude Oil* (Larutan Pengkorosi)



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS BRAWIJAYA FAKULTAS MIPA

JURUSAN KIMIA

Jl. Veteran Malang Jawa Timur 65145
Telepon: +62-341-575838 Fax: +62-341-554403 Website: <http://kimia.ub.ac.id> Email: kimia_ub@ub.ac.id

LAPORAN HASIL ANALISIS

NO : 20210128/R.1/T.1/R.1/TT.150803/2021

1. Data Konsumen
Nama : Achirul Jamhar
Instansi : Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya
Alamat : Jl. MT Haryono Malang
Telepon : 085704006106
Status : Mahasiswa S-1
Keperluan Analisis : Uji Kuantitas
2. Sampling Dilakukan Oleh : Konsumen
3. Identifikasi Sampel
Nama Sampel : *Crude Oil*
Wujud : Cair
Warna : Hitam
Bau : Ada Bau
4. Prosedur Analisis : Dilakukan oleh Unit Analisis dan Pengukuran Jurusan Kimia FMIPA Universitas Brawijaya Malang
5. Penyampaian Laporan Hasil Analisis : Diambil Langsung
6. Tanggal Terima Sampel : 06 Mei 2021
7. Data Hasil Analisis :

| No | Kode | Parameter | Hasil Analisis | | Metode Analisis | |
|----|------|-----------|----------------|--------|---|------------------|
| | | | Kadar | Satuan | Pereaksi | Metode |
| 1. | CO | pH | 7,37 ± 0,01 | - | - | pHmetri |
| 2. | CO | S | 616,08 ± 0,00 | mg/kg | Mg(NO ₃) ₂ dan BaCl ₂ | Spektrofotometri |

Catatan:

1. Hasil analisis ini adalah nilai rata-rata pengerjaan analisis secara duplo,
2. Hasil analisis ini hanya berlaku untuk sampel yang kami terima dengan kondisi sampel saat itu.

Mengesahkan
Ketua Jurusan Kimia,

Yuniar Ponco Prananto, S.Si., M.Sc., Ph.D.
NIP. 198106202005011002

Malang, 15 Juni 2021

Ketua Unit Analisis dan Pengukuran,

Moh. Farid Rahman, S.Si., M.Si.
NIP. 197007201997021001

Lampiran 6 Hasil Analisis Kandungan Sulfur dan pH Air Laut (Larutan Pengkorosi)



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS BRAWIJAYA FAKULTAS MIPA
JURUSAN KIMIA

Jl. Veteran Malang Jawa Timur 65145
Telepon: +62-341-575838 Fax: +62-341-554403 Website: <http://kimia.ub.ac.id> Email: kimia_ub@ub.ac.id

LAPORAN HASIL ANALISIS

NO : 20210146/R.1/T.1/R.1/TT.150803/2021

1. Data Konsumen

Nama : Achirul Jamhar
Instansi : Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya
Alamat : Jl. MT Haryono Malang
Telepon : 085704006106
Status : Mahasiswa S-1
Keperluan Analisis : Uji Kuantitas
2. Sampling Dilakukan Oleh : Konsumen

3. Identifikasi Sampel

Nama Sampel : **Air Laut**
Wujud : Cair
Warna : Bening
Bau : Tidak Ada Bau

4. Prosedur Analisis

: Dilakukan oleh Unit Analisis dan Pengukuran Jurusan
Kimia FMIPA Universitas Brawijaya Malang

5. Penyampaian Laporan Hasil Analisis

: Diambil Langsung

6. Tanggal Terima Sampel

: 25 Mei 2021

7. Data Hasil Analisis

| No | Kode | Parameter | Hasil Analisis | | Metode Analisis | |
|----|------|-----------|----------------|--------|---|------------------|
| | | | Kadar | Satuan | Pereaksi | Metode |
| 1. | AL | pH | 7,81 ± 0,01 | - | - | pHmetri |
| 2. | AL | S | 424,88 ± 0,06 | mg/kg | Mg(NO ₃) ₂ dan BaCl ₂ | Spektrofotometri |

Catatan:

- Hasil analisis ini adalah nilai rata-rata pengerjaan analisis secara duplo,
- Hasil analisis ini hanya berlaku untuk sampel yang kami terima dengan kondisi sampel saat itu.

Mengesahkan,
Ketua Jurusan Kimia,

Yuniar Ponco Prananto, S.Si., M.Sc., Ph.D.
NIP. 198106202005011002

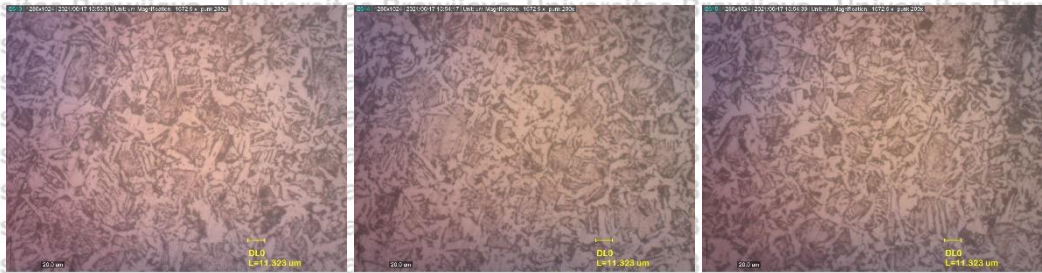
Malang, 15 Juni 2021

Ketua Unit Analisis dan Pengukuran,

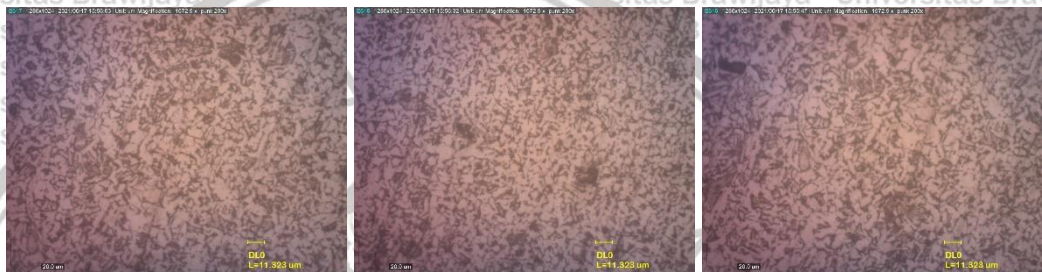
Moh. Farid Rahman, S.Si., M.Si.
NIP. 197007201997021001

Lampiran 7 Hasil Foto Mikrostruktur Spesimen

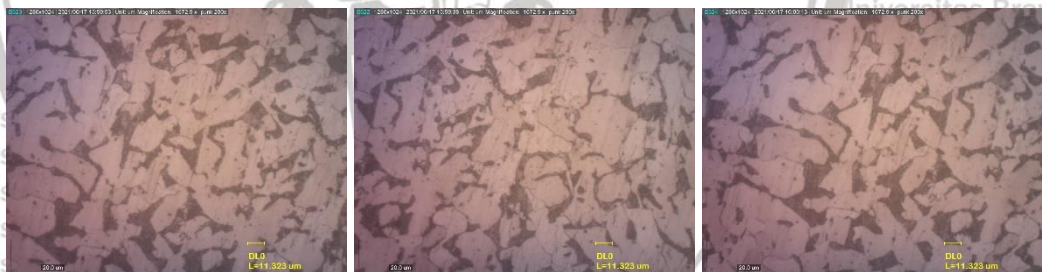
Weld Metal



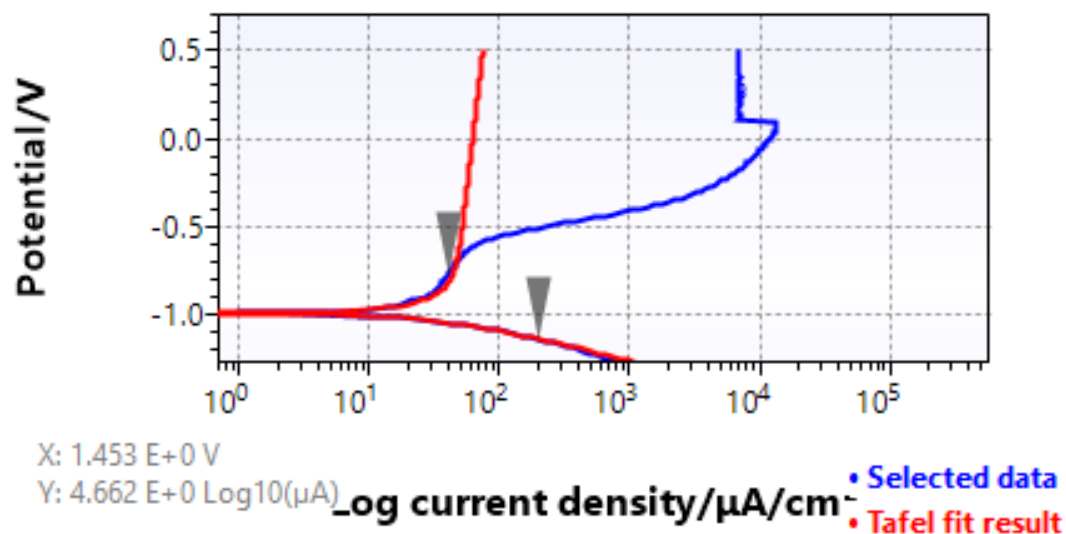
Heat Affected Zone (HAZ)



Base Metal

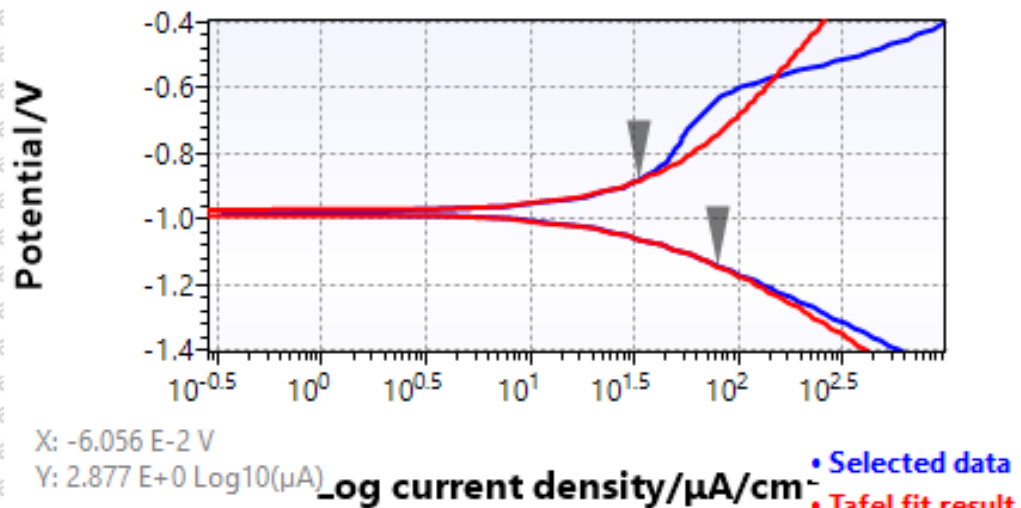


Lampiran 8 Hasil Tafel Plot dan Laju Korosi Raw Material



| Tafel slopes | Manual | |
|--|----------|--|
| E corrosion, V | -0.958 | |
| I corrosion, μA | 203.6 | |
| I corrosion per surface area, A/cm^2 | 8.703E-5 | |
| Polarization Resistance, Ω | 435.6 | |
| Anodic β Tafel constant, V/decade | 0.564 | |
| Cathodic β Tafel constant, V/decade | 0.320 | |
| Corrosion rate, mm/year | 1.027 | |

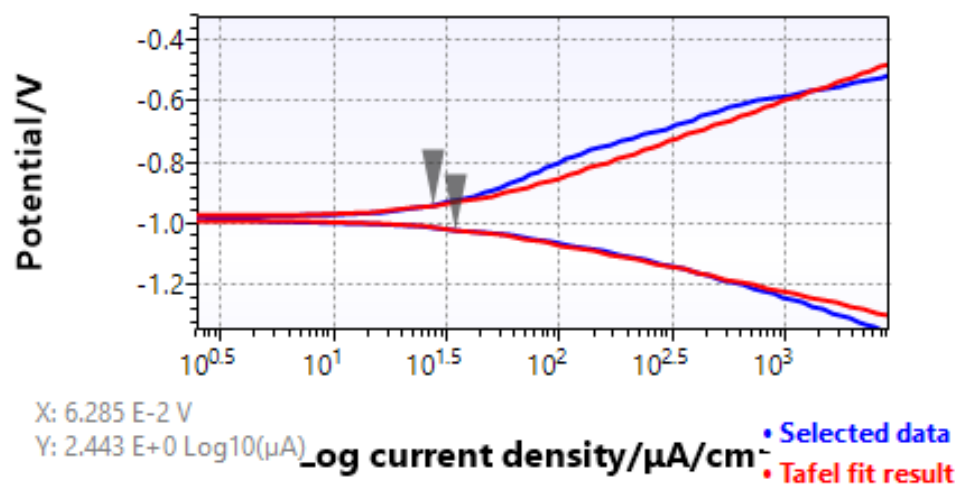
Lampiran 9 Hasil Tafel Plot dan Laju Korosi Spesimen dengan Variasi 6 Menit



Tafel fit results

| Butler-Volmer | Manual | Auto |
|--|----------|----------|
| E corrosion, V | -0.980 | -0.980 |
| I corrosion, μA | 99.90 | 125.3 |
| I corrosion per surface area, A/cm^2 | 4.460E-5 | 5.593E-5 |
| Polarization Resistance, Ω | 1192 | 1220 |
| Anodic β Tafel constant, V/decade | 0.762 | 1.301 |
| Cathodic β Tafel constant, V/decade | 0.428 | 0.482 |
| Corrosion rate, mm/year | 0.526 | 0.660 |

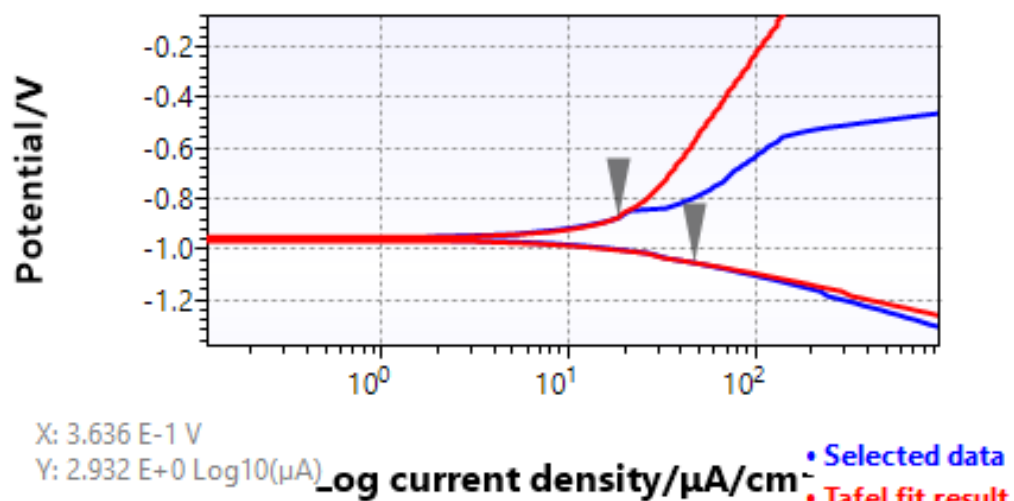
Lampiran 10 Hasil *Tafel Plot* dan Laju Korosi Spesimen dengan Variasi 8 Menit



Tafel fit results

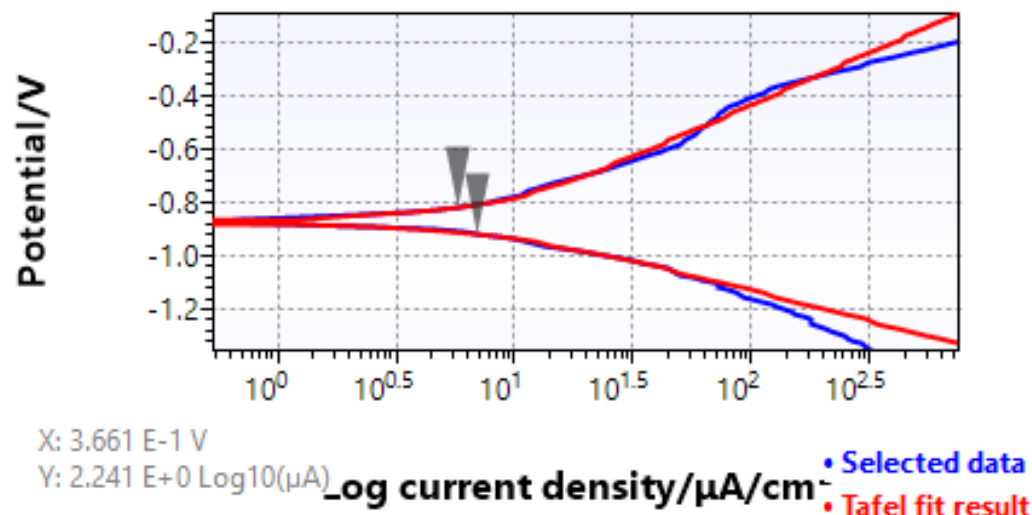
| Butler-Volmer | Manual | Auto |
|--|----------|----------|
| E corrosion, V | -0.980 | -0.980 |
| I corrosion, μA | 85.88 | 2.620E+4 |
| I corrosion per surface area, A/cm^2 | 3.316E-5 | 0.010 |
| Polarization Resistance, Ω | 507.1 | 88.34 |
| Anodic β Tafel constant, V/decade | 0.258 | 8.424 |
| Cathodic β Tafel constant, V/decade | 0.164 | 14.512 |
| Corrosion rate, mm/year | 0.391 | 119.4 |

Lampiran 11 Hasil *Tafel Plot* dan Laju Korosi Spesimen dengan Variasi 10 Menit



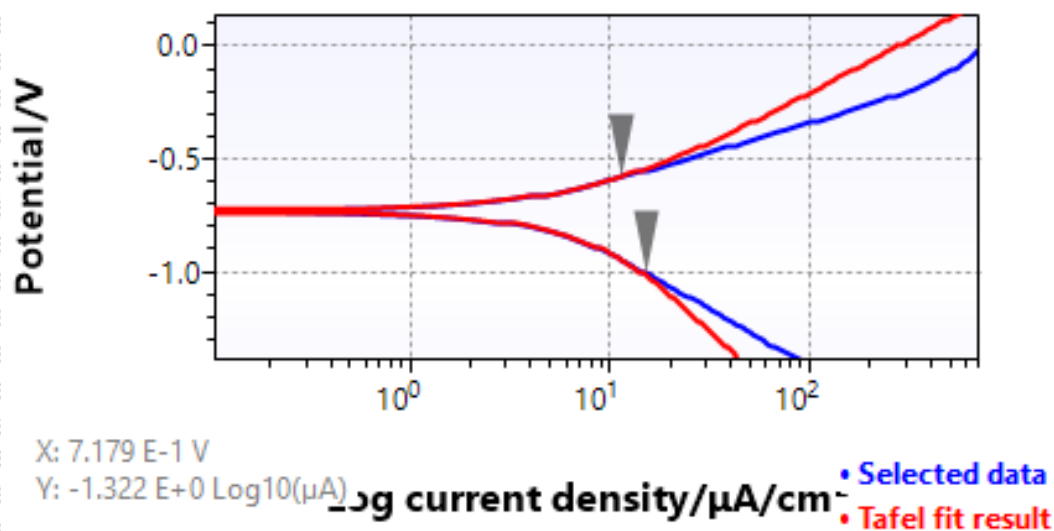
| Parameter | Manual | Auto |
|--|----------|--------|
| E corrosion, V | -0.960 | -0.960 |
| I corrosion, μA | 49.99 | 5191 |
| I corrosion per surface area, A/cm^2 | 2.024E-5 | 0.002 |
| Polarization Resistance, Ω | 1333 | 208.6 |
| Anodic β Tafel constant, V/decade | 1.053 | 4.580 |
| Cathodic β Tafel constant, V/decade | 0.180 | 5.474 |
| Corrosion rate, mm/year | 0.239 | 24.81 |

Lampiran 12 Hasil *Tafel Plot* dan Laju Korosi Spesimen dengan Variasi 12 Menit



| Butler-Volmer | Manual | Auto |
|-------------------------------------|----------|----------|
| E corrosion, V | -0.870 | -0.870 |
| I corrosion, μA | 18.82 | 22.98 |
| I corrosion per surface area, A/cm² | 7.778E-6 | 9.498E-6 |
| Polarization Resistance, Ω | 3359 | 5564 |
| Anodic β Tafel constant, V/decade | 0.392 | 0.362 |
| Cathodic β Tafel constant, V/decade | 0.232 | 1.570 |
| Corrosion rate, mm/year | 0.092 | 0.112 |

Lampiran 13 Hasil *Tafel Plot* dan Laju Korosi Spesimen dengan Variasi 14 Menit



Tafel fit results

| Butler-Volmer | Manual | Auto |
|--|----------|----------|
| E corrosion, V | -0.730 | -0.730 |
| I corrosion, μA | 18.27 | 23.93 |
| I corrosion per surface area, A/cm^2 | 8.157E-6 | 1.068E-5 |
| Polarization Resistance, Ω | 7408 | 4322 |
| Anodic β Tafel constant, V/decade | 0.478 | 0.378 |
| Cathodic β Tafel constant, V/decade | 0.897 | 0.643 |
| Corrosion rate, mm/year | 0.096 | 0.126 |

Lampiran 14 Hasil Foto Scanning Electron Microscope Raw Material

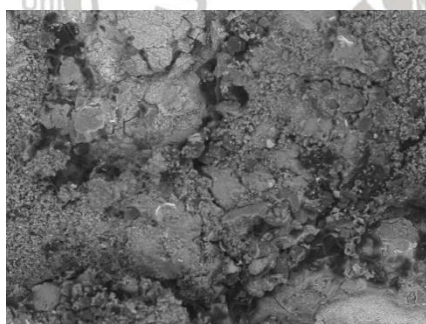
Sesudah Uji Laju Korosi

Perbesaran 400x

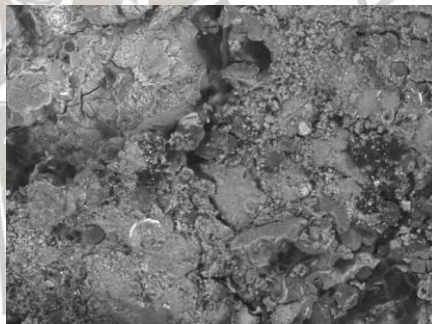
Perbesaran 600x

Perbesaran 800x

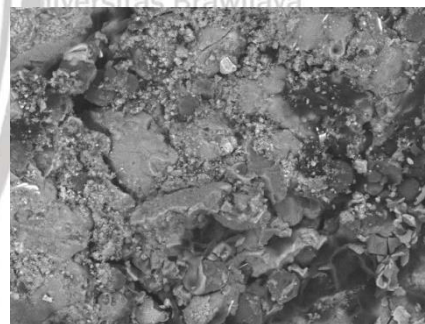
Perbesaran 1000x



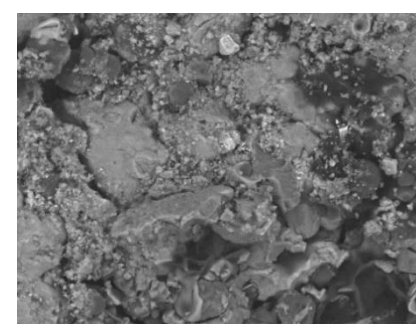
UMM2799 2021/06/10 10:13 NL D5,5 x400 200 um



UMM2800 2021/06/10 10:14 NL D5,5 x600 100 um



UMM2801 2021/06/10 10:15 NL D5,4 x800 100 um



UMM2802 2021/06/10 10:15 NL D5,4 x1,0k 100 um

Lampiran 15 Hasil Foto *Scanning Electron Microscope* Spesimen Variasi 6 Menit

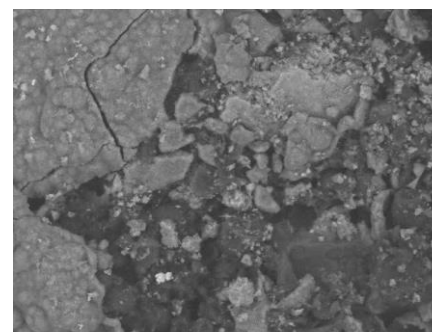
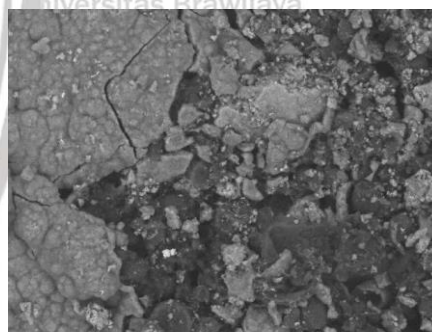
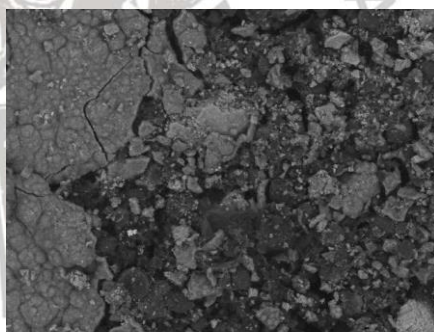
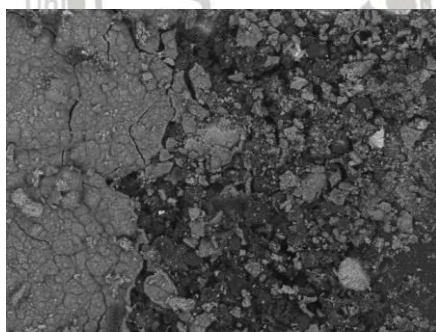
Sesudah Uji Laju Korosi

Perbesaran 400x

Perbesaran 600x

Perbesaran 800x

Perbesaran 1000x



Lampiran 16 Hasil Foto *Scanning Electron Microscope* Spesimen Variasi 8 Menit

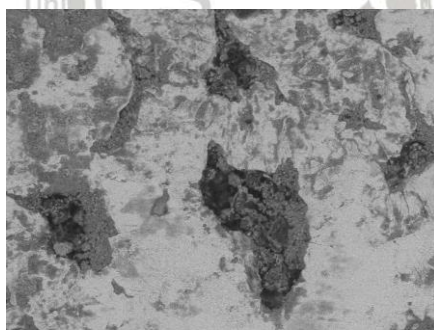
Sesudah Uji Laju Korosi

Perbesaran 400x

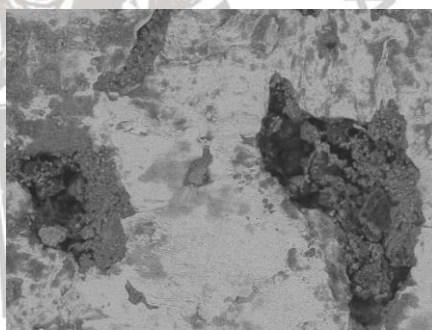
Perbesaran 600x

Perbesaran 800x

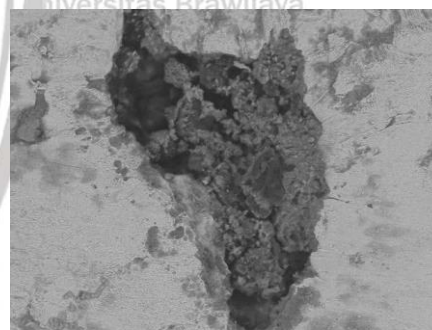
Perbesaran 1000x



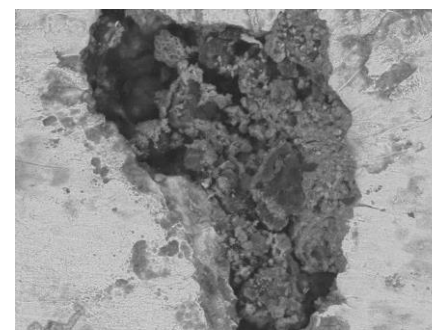
UMM2759 2021/06/07 09:30 NL D5,3 x400 200 um



UMM2760 2021/06/07 09:31 NL D5,3 x600 100 um



UMM2761 2021/06/07 09:32 NL D5,3 x800 100 um



UMM2762 2021/06/07 09:32 NL D5,3 x1,0k 100 um

Lampiran 17 Hasil Foto *Scanning Electron Microscope* Spesimen Variasi 10 Menit

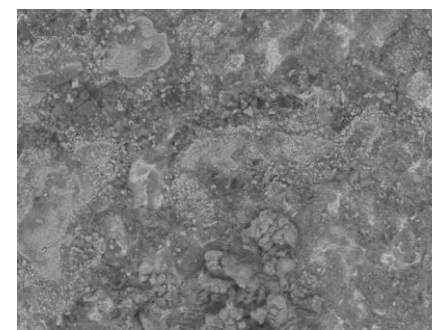
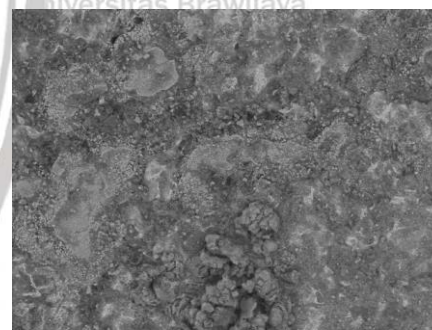
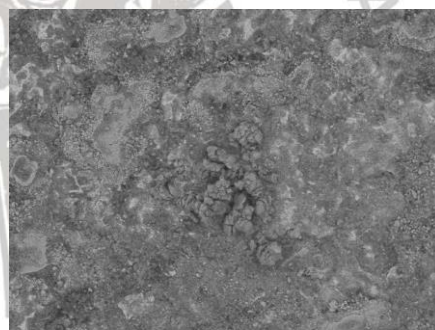
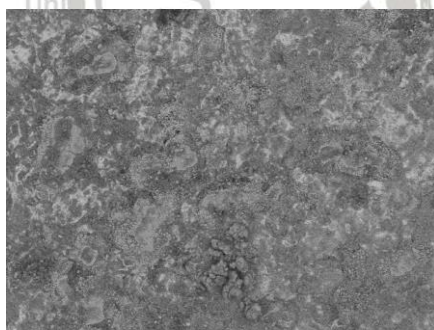
Sesudah Uji Laju Korosi

Perbesaran 400x

Perbesaran 600x

Perbesaran 800x

Perbesaran 1000x



Lampiran 18 Hasil Foto *Scanning Electron Microscope* Spesimen Variasi 12 Menit

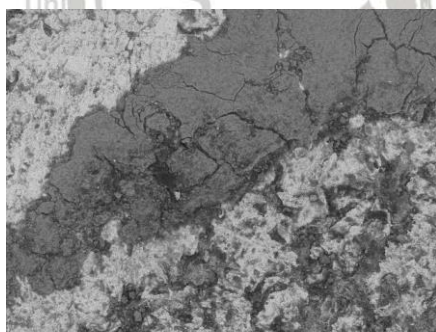
Sesudah Uji Laju Korosi

Perbesaran 400x

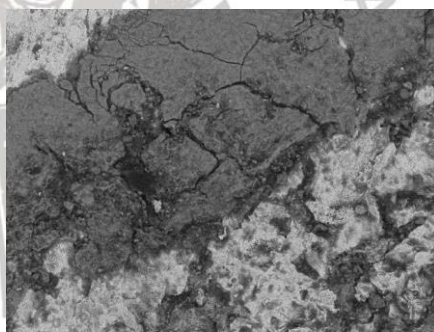
Perbesaran 600x

Perbesaran 800x

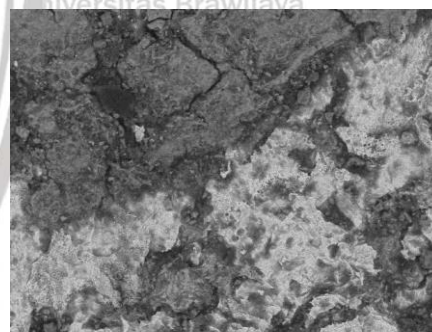
Perbesaran 1000x



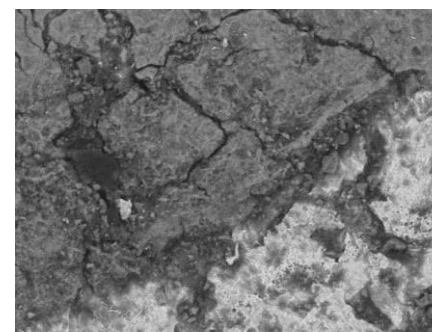
UMM2755 2021/06/07 09:14 NL D6,4 x400 200 µm



UMM2756 2021/06/07 09:20 NL D6,4 x600 100 µm



UMM2757 2021/06/07 09:21 NL D6,3 x800 100 µm



UMM2758 2021/06/07 09:22 NL D6,3 x1,0k 100 µm

Lampiran 19 Hasil Foto *Scanning Electron Microscope* Spesimen Variasi 14 Menit

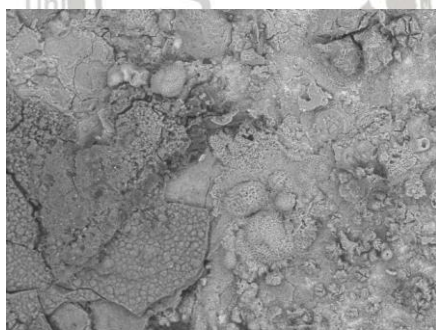
Sesudah Uji Laju Korosi

Perbesaran 400x

Perbesaran 600x

Perbesaran 800x

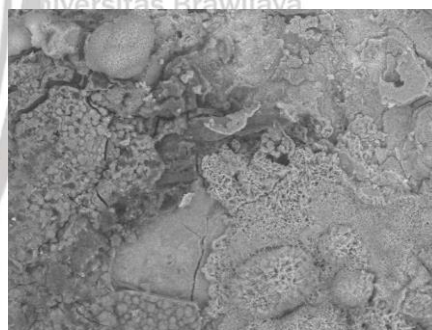
Perbesaran 1000x



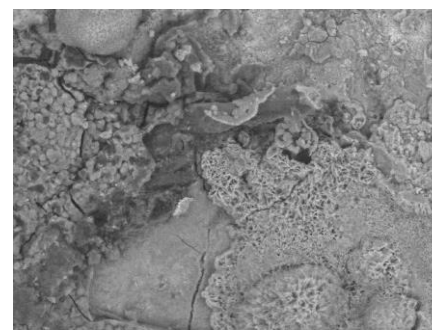
UMM2751 2021/06/07 09:04 NL D5.2 x400 200 um



UMM2752 2021/06/07 09:05 NL D5.3 x600 100 um



UMM2753 2021/06/07 09:06 NL D5.3 x800 100 um



UMM2754 2021/06/07 09:06 NL D5.3 x1,0k 100 um